

Controles mineralógicos e geoquímicos do níquel em rochas ultramáficas no Escudo Sul-Riograndense

Mineralogical and geochemical controls of nickel in the ultramafic rocks of Sul-Riograndense Shield

Thamy Lara de Souza¹, Marcus Vinícius Dorneles Remus¹, Norberto Dani¹

¹Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Avenida Bento Gonçalves 9.500, Caixa Postal 15001, CEP 91500-000, Porto Alegre, RS, BR (thamylarageo@gmail.com; marcus.remus@ufrgs.br; norberto.dani@ufrgs.br)

Recebido em 16 de janeiro de 2014; aceito em 17 de outubro de 2014

Resumo

Este trabalho investiga os processos controladores da mobilidade e concentração do níquel em rochas ultramáficas serpentinizadas no Escudo Sul-Riograndense (ESrg). Foram selecionadas quatro unidades ultramáficas: Complexo Serrinha, Sequência Cerro Mantiqueira, Maciço Pedras Pretas e Complexo Cambaizinho. Com o uso de técnicas convencionais foi possível classificar quimicamente as rochas e relacionar os aspectos texturais com a variação da intensidade dos diferentes eventos que modificaram a mineralogia dos protólitos. Por meio da microsonda eletrônica foram analisadas olivinas e serpentinas para a determinação das concentrações de níquel e suas variações nas unidades investigadas. Foram identificados os minerais portadores de níquel e a relação dos eventos com a mobilidade e concentração dos elementos ao nível da rocha. As olivinas do Maciço Pedras Pretas contêm baixos teores em níquel, com valores variando de 0,08 a 0,29%, e um valor médio de 0,17%, enquanto as olivinas da Sequência Cerro Mantiqueiras contêm teores mais elevados de NiO (máximo 0,44%), estabelecendo um valor médio de 0,35%. Em relação à composição, as olivinas do Maciço Pedras Pretas e da Sequência Cerro Mantiqueiras são homogêneas, enquanto aquelas do Complexo Cambaizinho mostram variações composicionais entre Fo_{92} e Fo_{84} e teores de NiO entre 0,17 e 0,30%. No Complexo Serrinha não foram identificadas olivinas devido à intensa serpentinização. No Complexo Cambaizinho e Sequência Cerro Mantiqueiras as serpentinas tendem a apresentar concentrações de níquel mais elevadas que o determinado para as olivinas do protólito, porém, nesta última sequência, os teores também empobrecem em algumas serpentinas. Com a comparação das concentrações de níquel entre as unidades foi possível identificar que a Sequência Cerro Mantiqueiras apresentou os maiores valores de NiO nas olivinas, enquanto o Maciço Pedras Pretas, as menores concentrações. Outra importante constatação é que os teores de níquel nas unidades estudadas do ESrg são equivalentes aos valores observados em outras rochas ultramáficas no mundo.

Palavras-chave: Olivina; Serpentinização; Cerro Mantiqueiras; Microsonda eletrônica.

Abstract

This work investigates the processes controlling the mobility and concentration of nickel in serpentinized ultramafic rocks of the Sul-Riograndense Shield (ESrg). Four ultramafic units were selected: Serrinha Complex, Cerro Mantiqueira Sequence, Pedras Pretas Massive and Cambaizinho Complex. Conventional techniques allow to chemically classify the rocks and to relate rock texture with the intensity and degree of the different events that contributed to changes in the mineralogy of the protholiths. Electron microprobe analysis of olivine and serpentine allowed determining the concentrations of nickel and its variations in all of the investigated units. The nickel-bearing minerals were identified, and established the relationship between geological events, element mobility and element concentration. The olivine of Pedras Pretas Massive contain lower levels of nickel with a range of 0.08 to 0.29%, and an average value of 0.17%, while olivines of Cerro Mantiqueiras Sequence contain higher NiO levels (maximum 0.44%), with an average value of 0.35%. The olivine composition of Pedras Pretas Massive and Cerro Mantiqueiras Sequence are homogeneous, while those of Cambaizinho Complex have a slightly higher range of variation with composition ranging between Fo_{92} and Fo_{84} , but with NiO amounts between 0.17 and 0.30%. In Serrinha Complex, the olivine was not identified probably due to the intense serpentinization. Cambaizinho Complex and Cerro Mantiqueiras Sequence have serpentine minerals with a tendency to higher concentrations of nickel in relation to values obtained in the olivines, but some serpentines have lower values in the last sequence. By comparing the concentrations of nickel in

each ultramafic unit, the olivines of Cerro Mantiqueiras Sequence have the highest NiO values, while Pedras Pretas Massive has the lowest values among the investigated ultramafic rocks. It is important to mention that the NiO concentration in the studied ultramafic units show equivalent values when compared to the other ultramafics around the world.

Keywords: Olivine; Serpentinization; Cerro Mantiqueiras; Electron microprobe.

INTRODUÇÃO

No conjunto litológico do Escudo Sul-Riograndense (ESrg) ocorrem significativas participações de associações de rochas máfico-ultramáficas do Pré-cambriano. Nas condições climáticas do Brasil, as rochas ultramáficas constituem, frequentemente, importante substrato para a formação de prospectos de níquel (Ni) do tipo silicatado a partir do processo de alteração supergênica (Trescases et al., 1974; Menegotto, 1982; Oliveira e Trescases, 1985; Melfi et al., 1988; Tomazoni, 2011; Butt e Cluzel, 2013). O desenvolvimento de uma mineralização supergênica de níquel depende de vários fatores, sendo que o enfoque desta pesquisa está direcionado ao estudo da rocha e sua importância como controladora da concentração inicial do Ni, assim como o tipo de estrutura mineral hospedeira. Para a compreensão de um depósito silicatado de níquel é fundamental entender a sistemática da distribuição dos elementos químicos na rocha e dos processos endógenos ígneos e metamórficos, responsáveis pela maior ou menor disponibilidade dos elementos durante a alteração do protólito. O Escudo Sul-Riograndense é adequado para estudos deste tipo porque contém extensas áreas com exposição de rochas ultramáficas. Acredita-se, porém, que as condições ambientais da região Sul não foram favoráveis para a formação de perfis de alteração concentradores de níquel. Por outro lado, no ESrg, a associação de rochas ultramáficas apresenta variada tipologia, propícia para a aplicação de estudos que envolvam a determinação do comportamento do Ni no sistema endógeno, em processos geológicos em que dominam o metamorfismo, metassomatismo e hidrotermalismo. Desse modo, o objetivo é investigar o comportamento do níquel nessas rochas e identificar os principais minerais hospedeiros. Utilizando técnicas baseadas na petrografia, microscopia eletrônica e análise química de rochas e minerais, propõe-se um detalhamento químico e mineralógico das rochas ultramáficas e serpentinitos associados com o objetivo de gerar um arcabouço de informações que auxiliem no entendimento do comportamento do Ni no sistema endógeno.

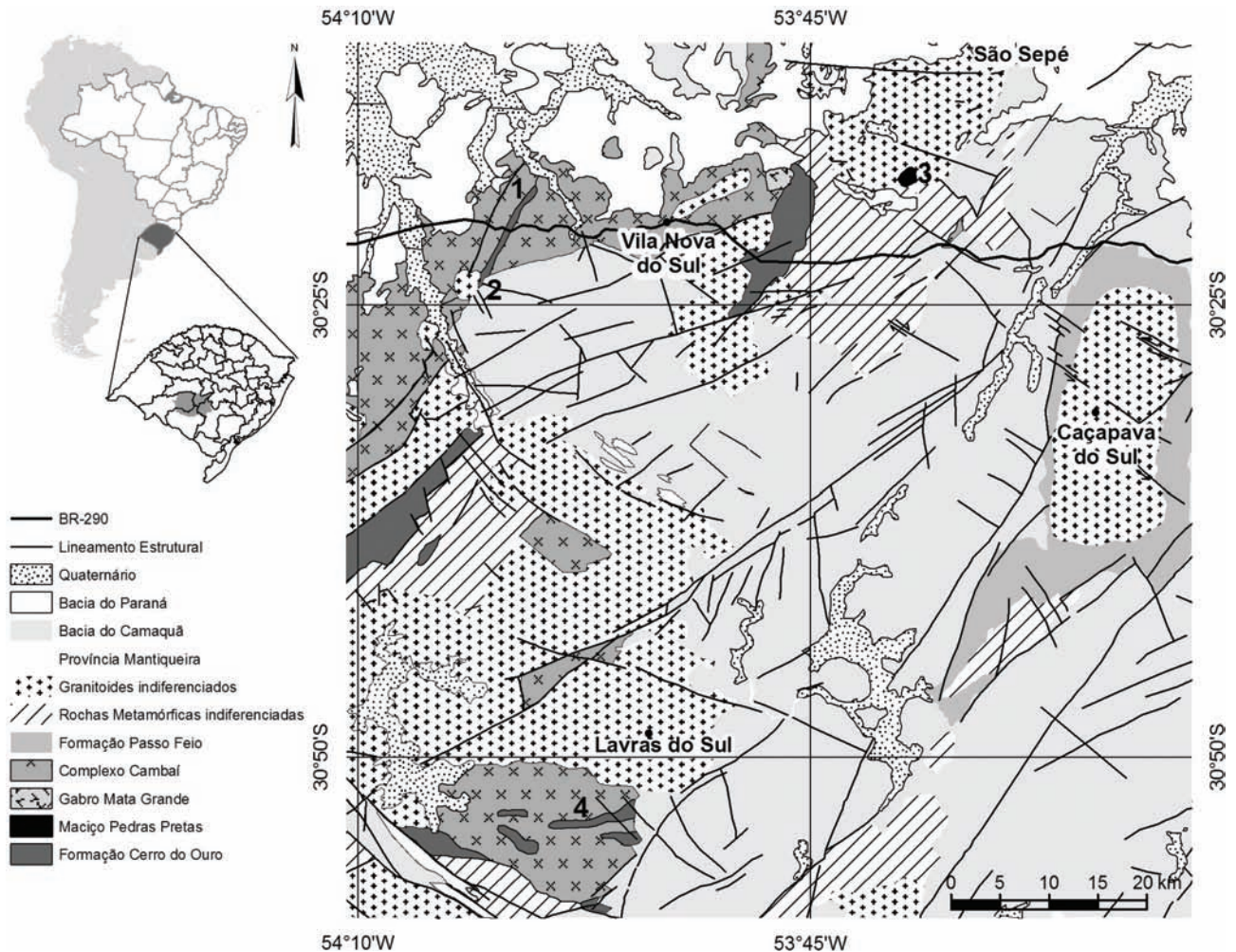
GEOLOGIA REGIONAL

A porção noroeste do ESrg é o domínio do Bloco São Gabriel (Jost e Hartmann, 1984). Denominado posteriormente de Terreno São Gabriel por Babinski et al. (1996) e Hartmann et al. (1999, 2000, 2007), é constituído por gnaisses cálcico-alcalinos juvenis cortados por metagranitoides, ambos

englobados no Complexo Cambaí, intrusivos em uma sequência vulcano-sedimentar dos Complexos Palma/Bossoroca/Cambaizinho. Neste terreno situam-se sequências neoproterozoicas (700 – 800 Ma) onde se incluem rochas máficas a ultramáficas, representadas por harzburgitos, dunitos, meta-peridotitos, serpentinitos, xistos magnesianos, anfíbolitos e gabros na forma de corpos alongados na direção NE-SW (Figura 1) e intercalados com metassedimentos nos complexos (1) Cambaizinho e (2) Serrinha, ou associados a gnaisses quartzo-feldspáticos como na (4) Sequência Cerro Mantiqueiras, ou ainda como intrusões no contato entre epimetamorfitos e granitos no (3) Maciço Pedras Pretas. As sequências diferenciam-se entre si com base em aspectos genéticos e não são identificadas mineralizações de natureza sulfetada ou silicatada de níquel (Ni) nessas áreas.

Maciço Pedras Pretas

As rochas ultramáficas do Maciço Pretas foram classificadas como estratiforme por Rêgo (1980), com base na identificação de variações composicionais entre camadas duníticas, peridotíticas, piroxeníticas, gabroicas e anortositicas. Os dados geoquímicos indicam uma composição magnésiana para as rochas ultramáficas, tendo sido identificados dois eventos metamórficos regionais, um de fácies anfíbolito e outro de fácies xisto verde. Conseqüentemente foram estabelecidos dois processos de serpentinização parcial da rocha, formando uma paragênese mineral principal para o metaperidotito, composta por cummingtonita, antofilita e lizardita. O controle da serpentinização é considerado estrutural e com intensidade máxima na borda da unidade, associado à brechação e aos fraturamentos preenchidos por veios de crisotilo. Apesar de os eventos terem afetado o protólito ultramáfico, as texturas e a mineralogia ígnea (olivina e enstatita) estão preservadas. São estabelecidas correlações positivas entre os teores de Ni, Cr e Co em rocha total, sendo proposto que a substituição do Fe e do Mg pelo Co e Ni ocorra durante a cristalização magmática (Rêgo, 1980). O conteúdo de Ni apresenta um intervalo de variação maior que o conteúdo de Co, com a razão Ni/Co em torno de 5,4 nos piroxenitos até 15,4 nos dunitos, sendo a olivina o mineral concentrador do Ni (Rêgo, 1980). D'Avila et al. (1985) revelam texturas e associações mineralógicas da fácies hornblenda-cornubianito, assim como dados geoquímicos com caráter de um mega-xenólito estratiforme para o maciço, provavelmente a partir da cristalização fracionada de magma komatiítico em pequena profundidade.



Fonte: modificado de Wildner et al. (2006).

Figura 1. Localização da área de estudo e posicionamento das rochas ultramáficas dentro do contexto geológico no noroeste do ESrg. (1) Complexo Cambaizinho; (2) Complexo Serrinha; (3) Maciço Pedras Pretas; (4) Sequência Cerro Mantiqueiras.

Sequência Cerro Mantiqueiras

A Sequência Cerro Mantiqueiras é composta por harzburgitos ricos em ortopiroxênios e serpentinitos. Leite (1997) estabelece que os dados geoquímicos evidenciam a transformação parcial dos harzburgitos, que mantêm uma assinatura depletada, permitindo a avaliação de sua origem a partir dos processos de empobrecimento do manto superior por repetidas retiradas de elementos incompatíveis. Para o autor, os harzburgitos são afetados apenas pelo evento de serpentinização mais antigo em um grau relativamente baixo, fato que associado ao regime estrutural plástico classificaria estes harzburgitos como tectonitos mantélicos. O autor confirma a ocorrência de olivina e ortopiroxênios na sequência e classifica as olivinas em olivina 1 e olivina 2, de acordo com a textura e o conteúdo da molécula forsterita (Fo). A olivina 1 tem extinção ondulante, Fo_{87-90} e teores de NiO entre 0,30% e

0,42%. A olivina 2 não apresenta feições deformacionais e ocorre crescendo sobre a olivina 1, contendo Fo_{89-92} e teores de NiO até 0,33%. O autor conclui que as olivinas exibem correlações positivas entre os teores de NiO e Fo, e que a sua transformação durante o processo de serpentinização promoveu a distribuição do Ni para os minerais de serpentina. Posteriormente, Hartmann e Chemalle (2003) evidenciam eventos polimetamórficos e deformacionais para o Ofiolito Cerro Mantiqueiras. Inicialmente presumem a colocação do manto peridotítico na crosta e, sequencialmente, etapas de serpentinização na seguinte sucessão de eventos:

- (i) peridotito completamente serpentinizado, com destruição das microestruturas e da mineralogia ígnea;
- (ii) formação de rochas monominerálicas e metassomáticas próximas aos contatos com as rochas graníticas, contendo albita, clorita, tremolita/talco e intensa deformação;

- (iii) metamorfismo progressivo levando à recristalização de todas as características mantélicas e formação da assembleia mineralógica (M1) na fácies anfibolito médio, contendo olivina, enstatita, tremolita, clorita e cromita;
- (iv) metamorfismo em zonas de cisalhamento, formando, na fácies anfibolito inferior, a assembleia mineral (M2) contendo talco, clorita, tremolita, antofilita e Cr-magnetita;
- (v) extensa serpentinização do ofiolito;
- (vi) geração de zonas de cisalhamento estreitas com cristalização de crisotilo. Neste trabalho, os autores apresentam análises de olivinas realizadas com microsonda eletrônica com teores de Fo_{87-92} e de NiO entre 0,23% e 0,42%.

Complexo Serrinha

O Complexo Serrinha é constituído por serpentinitos e xistos magnesianos encaixados em metassedimentos do Complexo

Cambaizinho, ao longo de falhas NE (Vieira, 1981; Remus, 1990). No processo de serpentinização do Serrinha ocorreu a remobilização do SiO_2 , Al_2O_3 e CaO . O teor de MgO aumenta nas rochas mais serpentinizadas, e o Fe^{2+} oxida-se para Fe^{3+} , precipitando magnetita e hematita nas fraturas e entre as fibras e lamelas dos polimorfos de serpentina. Considera-se que o peridotito foi submetido a três eventos metamórficos:

- (i) serpentinização na fácies xisto verde com formação da lizardita e crisotilo, assim como texturas pseudomórficas (Figura 2C);
- (ii) alteração do serpentinito na fácies anfibolito, com formação de paragênese composta por antigorita, olivina metamórfica, tremolita e texturas não pseudomórficas;
- (iii) metamorfismo na fácies xisto verde, responsável pela serpentinização parcial da olivina metamórfica anterior e pela formação da lizardita e do crisotilo. O comportamento do Cr, Ni, Co e Mn nas rochas mostra que a



Figura 2. Aspectos de campo das unidades ultramáficas. (A) afloramento estratiforme do Maciço Pedras Pretas; (B) textura *jackstraw* no serpentinito do Complexo Serrinha; (C) afloramento da Sequência Cerro Mantiqueiras na forma de blocos fraturados e alongados; (D) textura *jackstraw* com serpentinização da olivina metamórfica (em preto) e resquícios de talco (cor clara) no Complexo Cambaizinho.

afinidade entre esses elementos diminui nos serpentinitos, devido à remobilização do Ni durante a serpentinização, com o Ni redistribuído no talco e nas serpentinas em substituição ao Mg (Vieira, 1981).

Complexo Cambaizinho

O Complexo Cambaizinho é uma associação supracrustal constituída por uma sequência metassedimentar com rochas máfico-ultramáficas intercaladas (Remus, 1990; Remus et al., 1993). A sequência máfico-ultramáfica é constituída por serpentinitos, xistos magnesianos e anfíbolitos. Remus (1990) identificou quatro fases deformacionais acompanhadas por dois eventos metamórficos: o primeiro (M1) na fácies anfíbolito e o segundo (M2) na fácies xisto verde. Zonas de hidrotermalismo com processo de silicificação e carbonatação foram relacionadas às reativações de falhamentos. O autor sugere, para a gênese destas rochas máfico-ultramáficas, mecanismos envolvendo diferentes graus de fusão parcial do manto, com variações composicionais devido ao fracionamento do piroxênio, com modificações metassomáticas superimpostas, e compara a associação litológica e a afinidade geoquímica com komatiitos de terrenos *greenstone belt*. Desse modo, os xistos magnesianos e serpentinitos foram interpretados em um contexto de origem extrusiva e afinidade geoquímica komatiítica. Os teores de Ni e Cr dos serpentinitos são similares aos dos komatiitos e comparáveis aos peridotitos ofiolíticos. A análise de química mineral dos teores de NiO nas olivinas relictuais estabelece baixos teores e pouca variação entre as amostras. Os teores relativamente baixos e a pequena variação de NiO% (0,17 a 0,30%), combinados com características óticas e texturais, foram indicativos de uma origem metamórfica para as olivinas magnesianas do Cambaizinho (Evans e Trommsdorff, 1974; Nesbitt e Hartmann, 1986). Quanto ao comportamento dos elementos terras raras, Remus (1990) interpreta as anomalias negativas de Ce e Eu como indicativas de que as rochas ultramáficas extrusivas estiveram em contato com a água do mar, favorecendo modificações metassomáticas antes do metamorfismo que afetou essas rochas.

CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA

A análise petrográfica das diferentes unidades de rochas ultramáficas serpentinizadas seguiu as definições e recomendações de Evans e Trommsdorff (1974), Wicks e Whittaker (1977), O'Hanley (1993) e Evans (2010). Desse modo, foi possível reconhecer os processos modificadores do protólito ultramáfico em cada unidade.

Nos metaperidotitos do Maciço Pedras Pretas, a olivina e a enstatita estão presentes nas texturas ígneas, como a cumulática (Figura 3A), e nas texturas pseudomórficas de serpentina, como a textura *mesh*, com zonas centrais compostas por

olivina remanescente (Figura 3B) e bordas ou microfraturas preenchidas por veios de magnetita. Nas porções onde o processo de serpentinização é intenso, a textura *mesh* evolui para a *curtain*, com os núcleos de olivina transformados e com a recristalização da lizardita. É comum a enstatita aparecer corroída nas bordas e ser substituída por anfíbólio, assim como a magnetita apresentar-se parcialmente substituída pela hematita. A paragênese metamórfica é constituída por clorita, antofilita, cummingtonita, lizardita, crisotilo e magnetita.

Os serpentinitos da Sequência Cerro Mantiqueiras apresentam textura remanescente cumulática e *mesh* (Figura 3C). São compostos por olivina (Figura 3D), enstatita, antofilita, tremolita, lizardita, crisotilo, talco, clorita aluminosa, cromita, cromo-magnetita, ferro-cromita e magnetita. Algumas olivinas apresentam núcleos com extinção ondulante. Os ortopiroxênios estão parcialmente intercrescidos com os clinopiroxênios em lamelas de exsolução e são substituídos pelos anfibólios durante os eventos metamórficos (Leite, 1997).

Nos serpentinitos do Complexo Cambaizinho é comum a ocorrência da lizardita na forma de agregados xenomórficos, substituindo integralmente a olivina que, por consequência, tem rara ocorrência. Possuem ainda crisotilo em veios milimétricos seccionando a rocha, talco na forma de bastitas, tremolita, clorita, magnetita, dolomita e antofilita, mais restritas. A antigorita também é rara e ocorre na forma de lamelas milimétricas não pseudomórficas, associadas com tremolita e talco. São comuns as texturas *mesh* e *ribbon*. A textura *ribbon* se desenvolve a partir da deformação da textura *mesh*. A textura *jackstraw* (Figura 3F) é típica de olivina metamórfica (Figura 3E), que permanece com os núcleos preservados e seus limites originais marcados por trilhas de magnetita (Remus, 1990).

A paragênese mineral dos serpentinitos do Complexo Serrinha é constituída por olivina metamórfica (Figura 3G), antigorita, lizardita, tremolita, talco, clorita, dolomita, crisotilo e magnetita. Associada à paragênese metamórfica ocorre a cromita primária. Na microscopia é possível identificar as três fases de serpentinização. Segundo Evans (2010), a formação da antigorita ocorre em temperaturas próximas a 500°C (Figura 3H), da lizardita, a 400 – 300°C, e do crisotilo, a 200°C. A textura *mesh* ocorre na olivina metamórfica associada com magnetita nas zonas de fratura. Assim como no Complexo Cambaizinho, ocorrem no Complexo Serrinha as texturas de serpentinização denominadas *jackstraw* por Evans e Trommsdorff (1974), *ribbon* (Figura 3I), *curtain* por Wicks e Whittaker (1977) (Figura 3J).

GEOQUÍMICA

Os elementos maiores (Tabela 1) e traços (Tabela 2) obtidos permitem estabelecer algumas diferenças entre as unidades ultramáficas. Hallberg (1985), em função da concentração de Ni e Cr (Figura 4), definiu campos representativos para as rochas ultramáficas que, aplicados às amostras estudadas,

estabeleceria para o Complexo Serrinha um posicionamento dentro do campo dos komatiitos (K), enquanto o Complexo Cambaizinho pertenceria ao campo dos komatiitos cumuláticos, e a Sequência Cerro Mantiqueiras, ao grupo dos sills acamados

de alto magnésio (LMS). Seguindo esta sistemática, o Maciço Pedras Pretas não teve representação nos campos delimitados, provavelmente devido aos teores originalmente mais baixos em Cr nessas rochas ou ao fracionamento da cromita.

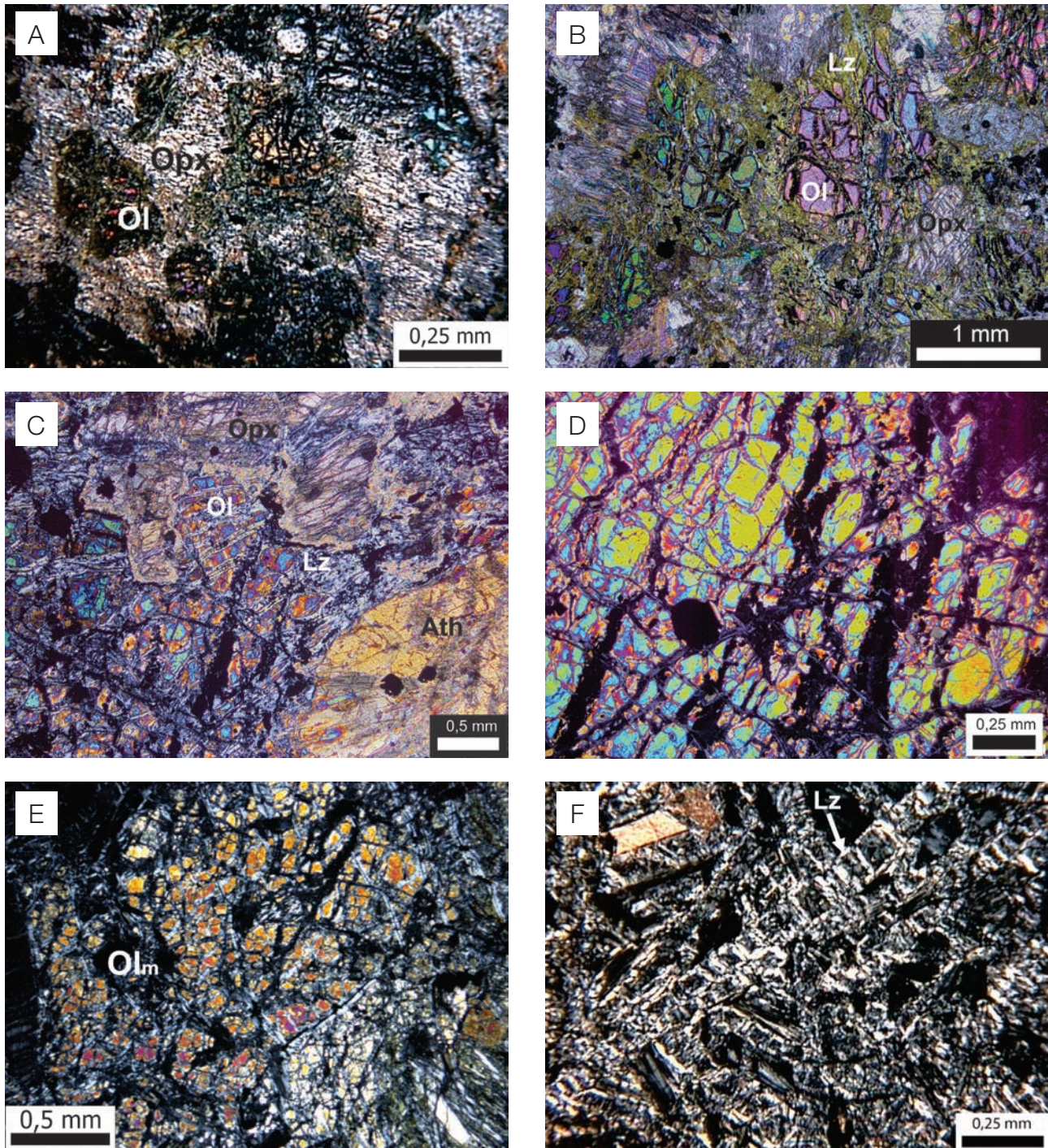


Figura 3. Fotomicrografias. Meta-peridotito do Maciço Pedras Pretas, em luz Polarizada. (A) textura cumulática entre olivina (Ol) e ortopiroxênio (Opx); (B) olivina (Ol), ortopiroxênio (Opx) e lizardita (Lz). Serpentinito da Sequência Cerro Mantiqueiras em luz polarizada. (C) textura cumulática entre olivina (Ol) e ortopiroxênio (Opx), parcialmente substituídos por lizardita (Lz) e antofilita (Ath); (D) olivina com textura *mesh*. Serpentinito do Complexo Cambaizinho em luz polarizada. (E) olivina metamórfica (Ol_m), (F) textura *jackstraw*. Serpentinito Serrinha em luz polarizada. (Continua...)

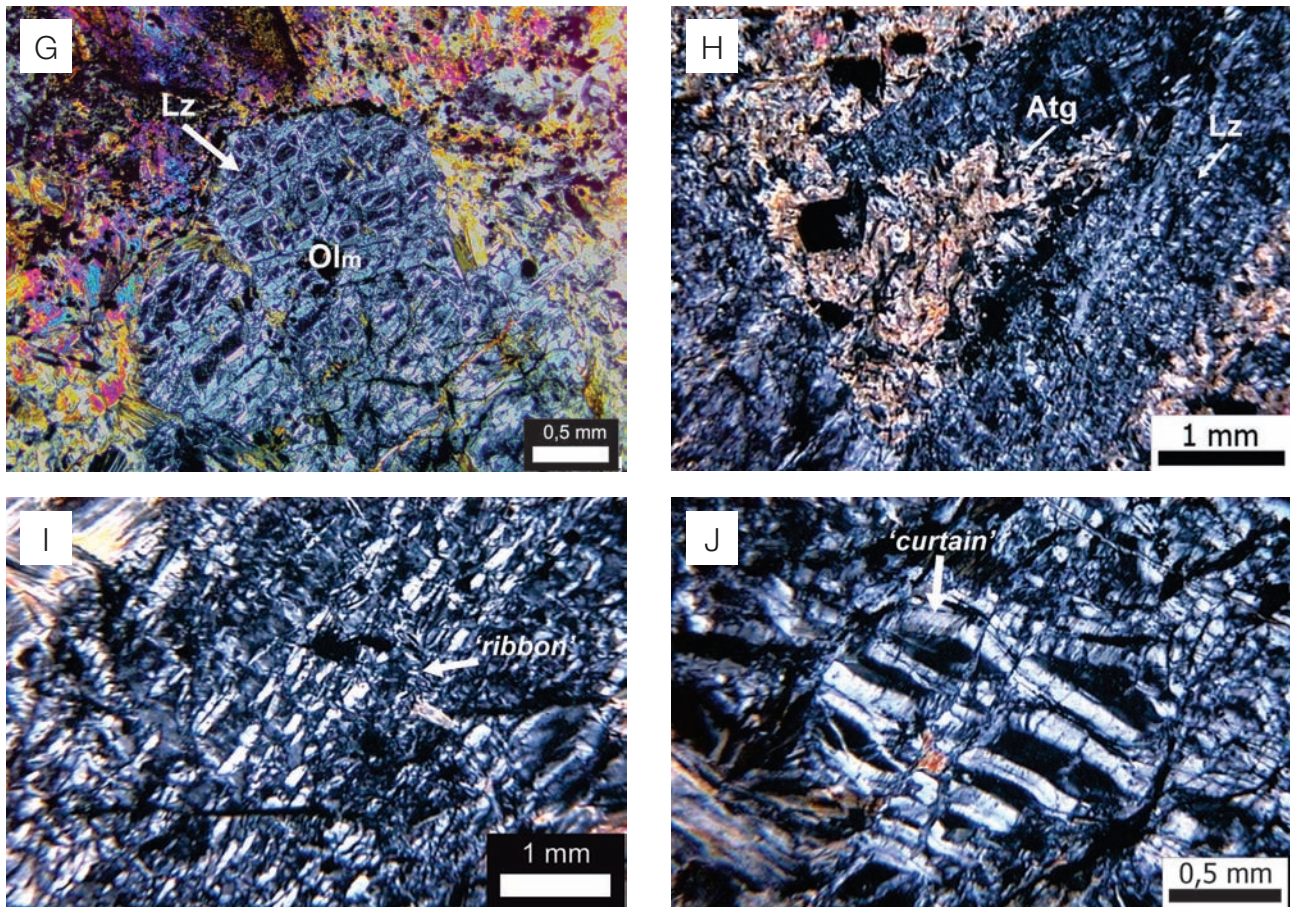


Figura 3. (Continuação) (G) olivina metamórfica (Ol_m) totalmente substituída por lizardita (Lz); (H) detalhe da textura *jackstraw* composta por lizardita (l) e antigorita (Atg); (I) textura *ribbon*; (J) textura *curtain*.

Comparando-se os teores dos elementos das rochas ultramáficas do ESrg com a composição do manto primitivo, como o idealizado por McDonough e Sun (1995), outras particularidades são identificadas. Inicialmente, observa-se o enriquecimento em Pb e os baixos teores em Ca em todas as unidades (Figura 5), com exceção para o Ca do Complexo Serrinha. A concentração do Mg, Si, P e Fe estão dentro da normalidade em relação à composição do manto primitivo utilizada como referência, ou seja, concentram-se próximas a constantes do valor 1 no diagrama. O La e o Yb estão empobrecidos, sendo exceção o enriquecimento em La no Complexo Cambaizinho. O Maciço Pedras Pretas e o Complexo Serrinha destacam-se no empobrecimento em Ni em relação ao manto primitivo, sendo que no Pedras Pretas, além do Ni, observam-se baixos teores em Cr. Não é constatado o enriquecimento dos elementos litófilos, como o Zr e o Al, que poderia ser sugestivo de contaminação crustal. As rochas do Complexo Cambaizinho com anomalia positiva de La podem indicar uma assinatura de manto original enriquecido em elementos terras raras, ou estar relacionado

a processos de retrabalhamento crustal com contaminação de magma mantélico.

Quando comparadas, as rochas dos Complexos Cambaizinho e Serrinha apresentaram concentrações de Ni entre 2.000 e 4.000 ppm, e Cr variando entre 2.000 e 3.000 ppm (Figura 6). Nessas rochas, a tendência de correlação positiva entre os teores de MgO com a perda ao fogo (PF) se constitui em um parâmetro indicativo da intensidade da serpentinização das unidades ultramáficas e dos teores mais elevados em MgO no protólito (Figura 7). De modo geral, as amostras da Sequência Cerro Mantiqueiras se destacam pelos teores mais elevados de Cr e MgO.

MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Foram obtidas imagens de elétrons retroespalhados (BSE) diretamente em lâminas petrográficas, sendo que a olivina do Maciço Pedras Pretas (Figura 8A) apresenta relevo mais elevado e uniforme no centro do mineral, quando comparado

com a serpentina (lizardita), que ocorre com feições de corrosão nas bordas. A textura *mesh* é evidenciada através da magnetita primária intercrescida sobre o centro da olivina e da magnetita secundária distribuída em veios e lamelas da lizardita (Figura 8B). A enstatita apresenta relevo elevado em

relação ao anfibólio que o substitui parcialmente nas bordas (Figura 8C). A olivina da Sequência Cerro Mantiqueiras conserva o núcleo primário com relevo alto e em partes, completamente substituída pela lizardita, apesar de preservar a forma do grão e a textura *mesh* (Figura 8D). Nas amostras

Tabela 1. Concentração em porcentagem de óxidos dos elementos maiores das unidades ultramáficas.

Local	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	PF	Total
PP	36,62	7,30	14,59	0,19	27,57	2,08	0,39	0,05	0,04	0,101	0,17	10,3	99,51
PP	37,39	6,00	15,59	0,20	27,27	3,05	0,54	0,05	0,04	0,108	0,27	8,9	99,49
PP	36,22	6,02	14,73	0,22	27,94	1,36	0,22	0,04	0,04	0,097	0,18	12,2	99,46
PP	35,92	4,49	14,84	0,19	29,97	1,38	0,19	0,03	0,04	0,111	0,12	12,1	99,48
SE	40,66	0,89	7,30	0,10	36,60	0,05	nd	nd	0,02	0,427	0,01	12,9	99,36
SE	40,05	1,08	6,36	0,10	37,56	0,03	nd	nd	0,02	0,307	0,01	13,6	99,35
SE	38,92	0,62	8,82	0,08	37,54	nd	nd	nd	0,01	0,369	nd	12,8	99,38
SE	37,28	2,03	8,99	0,09	36,82	0,03	nd	nd	nd	0,378	nd	13,5	99,38
SE	37,55	1,46	9,19	0,07	37,39	0,08	nd	nd	0,01	0,328	nd	13,0	99,38
SE	38,65	1,09	7,91	0,15	37,55	0,04	nd	nd	0,02	0,375	nd	13,3	99,37
SE	38,35	0,80	7,98	0,24	37,44	0,14	nd	nd	0,07	0,362	nd	13,7	99,36
CB	39,29	0,60	10,81	0,17	34,04	0,03	nd	0,01	nd	0,300	0,01	13,8	99,40
CB	38,90	1,12	11,08	0,19	33,44	0,04	nd	0,02	nd	0,356	0,02	13,9	99,41
CB	39,55	1,46	9,03	0,07	34,98	0,01	nd	nd	nd	0,435	0,01	13,6	99,40
CM	38,31	0,22	8,25	0,08	38,70	0,02	nd	nd	nd	0,639	nd	12,8	99,33
CM	38,35	0,16	7,47	0,10	38,91	nd	nd	nd	nd	0,501	nd	13,6	99,36
CM	38,34	0,21	7,06	0,05	39,42	nd	nd	nd	nd	0,620	nd	13,4	99,35
CM	44,30	0,57	10,56	0,17	34,40	0,10	nd	nd	nd	0,560	nd	8,6	99,42
CM	35,29	0,17	10,48	0,10	37,26	1,19	nd	nd	nd	0,544	nd	14,2	99,38
CM	43,94	0,82	10,93	0,16	35,50	0,08	nd	nd	nd	0,340	nd	7,5	99,41

PF: perda ao fogo (1000°C); PP: Maciço Pedras Pretas; SE: Complexo Serrinha; CB: Complexo Cambaizinho; CM: Sequência Cerro Mantiqueiras; nd: não detectado.

Tabela 2. Concentrações em ppm dos principais elementos traço das unidades ultramáficas.

Local	Amostra	Zr	V	Ba	Sr	Co	Ga	Sc	Sn	Cu	Ni	Pb	Zn	Total
PP	UM 2	2,1	58	18	60,2	110,6	6,0	5	6,0	54,9	708,4	11,5	47	99,51
PP	UM 3	4,9	73	18	73,3	126,4	5,4	12	2,0	143,9	882,6	1,1	37	99,49
PP	UM 6	3,0	47	24	34,4	159,1	5,1	8	4,0	438,3	1408,3	1,7	42	99,46
PP	UM 8	3,1	42	10	25,7	145,2	3,4	5	nd	151,1	865,2	0,7	54	99,48
SE	UM 10A	nd	41	51	4,9	139,9	1,7	3	nd	20,3	3622,4	1,1	34	99,36
SE	UM 10B	nd	41	41	2,0	102,1	2,0	5	2,0	5,0	2253,0	0,3	17	99,35
SE	UM 10D	nd	39	10	0,9	101,7	0,8	7	nd	5,9	2084,9	1,1	23	99,38
SE	UM 23A	nd	43	10	nd	117,2	2,3	11	1,2	10,2	2308,8	1,1	38	99,38
SE	UM 23B	0,2	42	nd	nd	98,2	1,5	11	1,7	20,1	2157,6	0,8	41	99,38
SE	UM 23C	nd	40	16	nd	123,5	1,2	9	3,1	4,4	2604,5	0,6	42	99,37
SE	UM 23D	nd	50	11	nd	154,9	nd	8	4,1	9,3	2184,9	0,8	40	99,36
CB	CCS 9A	4,0	36	31	3,0	254,8	0,9	9	nd	36,0	2562,7	0,4	72	99,40
CB	CCS 9B	14,5	36	28	3,7	248,2	1,5	7	2,0	19,2	3167,7	0,3	31	99,41
CB	CCS	nd	54	36	1,6	127,4	1,3	9	1,0	27,1	2134,7	0,1	26	99,40
CM	UM 26A	nd	11	160	nd	141,8	0,5	4	4,3	2,6	2699,3	1,6	27	99,33
CM	UM 26B	nd	16	1	nd	120,3	nd	7	0,7	0,7	2183,4	2,1	10	99,36
CM	UM 26C	nd	15	nd	nd	113,8	nd	5	0,7	0,7	1895,0	0,8	7	99,35
CM	UM 26D	nd	47	7	nd	89,3	1,0	14	6,2	8,9	957,4	1,7	24	99,42
CM	UM 26E	nd	26	nd	nd	109,7	1,4	4	25,4	7,1	1563,3	3,2	5	99,38
CM	UM 26F	nd	31	nd	nd	114,1	1,2	15	2,1	6,3	1056,0	3,0	25	99,41

PP: Maciço Pedras Pretas; SE: Complexo Serrinha; CB: Complexo Cambaizinho; CM: Sequência Cerro Mantiqueiras; nd: não detectado.

do Maciço Serrinha identifica-se a olivina completamente serpentinizada, apesar da leve diferença entre o centro e a borda na textura *mesh* (Figura 8E). Os veios preenchidos por magnetita evidenciam os limites entre os grãos de olivina. A identificação da antigorita é facilitada pelo hábito em lamelas fibrosas do mineral (Figura 8F).

MICROSSONDA ELETRÔNICA

Através dessa técnica, os minerais do grupo das olivinas e serpentinas das unidades ultramáficas estudadas foram analisados diretamente em lâmina delgada. As fórmulas das olivinas foram calculadas em função do número fixo de 4 átomos de oxigênios (Tabela 3), e as das serpentinas com base em 4 grupos OH (9 oxigênios), desprezando-se o teor de H₂O, visto que esta não foi avaliada nas análises com a microsonda (Tabela 4). O cálculo do teor da molécula de forsterita e a classificação das olivinas baseou-se na proporção da molécula de forsterita para fayalita, tendo por base a relação Mg/(Fe+Mg) das fórmulas minerais. Os resultados dos cálculos da fórmula dos minerais de olivinas e das serpentinas foram inicialmente verificados utilizando dados de análises padrão, apresentados por Deer et al. (1997), e conjuntos de análises semelhantes publicados para outros maciços ultramáficos, apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Análises pontuais no centro e na borda das olivinas não evidenciaram variações composicionais significativas para definir zonações nesses minerais. Devido à dificuldade em identificar olivinas nas amostras coletadas do Complexo Cambaizinho, foram utilizados os valores publicados por Remus (1990). No Complexo Serrinha não foram encontradas olivinas nas amostras coletadas. Em relação às serpentinas,

foram realizadas análises por microscopia ótica e eletrônica nas espécies identificadas lizardita (Lz) nas Figuras 8A, 8D e 8F, antigorita, na Figura 8E, e crisotilo.

Em relação à composição, as olivinas da Sequência Cerro Mantiqueiras e do Maciço Pedras Pretas destacam-se das demais por apresentarem um conteúdo da molécula de forsterita com um intervalo de variação menor, sendo que no Cerro Mantiqueiras predomina a Fo₈₈, enquanto no Pedras Pretas predominam largamente as olivinas com Fo₇₈ (Figura 9). No Complexo Cambaizinho as variações composicionais das olivinas são mais amplas, com valor modal das análises em torno de Fo₈₇, porém, observa-se a

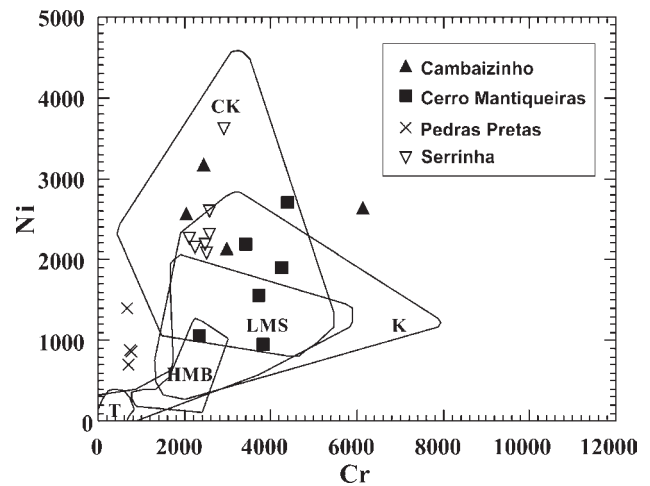


Figura 4. Distribuição das rochas ultramáficas estudadas em relação aos campos delimitados por Hallberg (1985). CK: Komatiíto Cumulático; K: Komatiíto; LMS: Sills acamados com alto teor de magnésio; HMB: Basalto com alto teor de magnésio; T: Tholeiito.

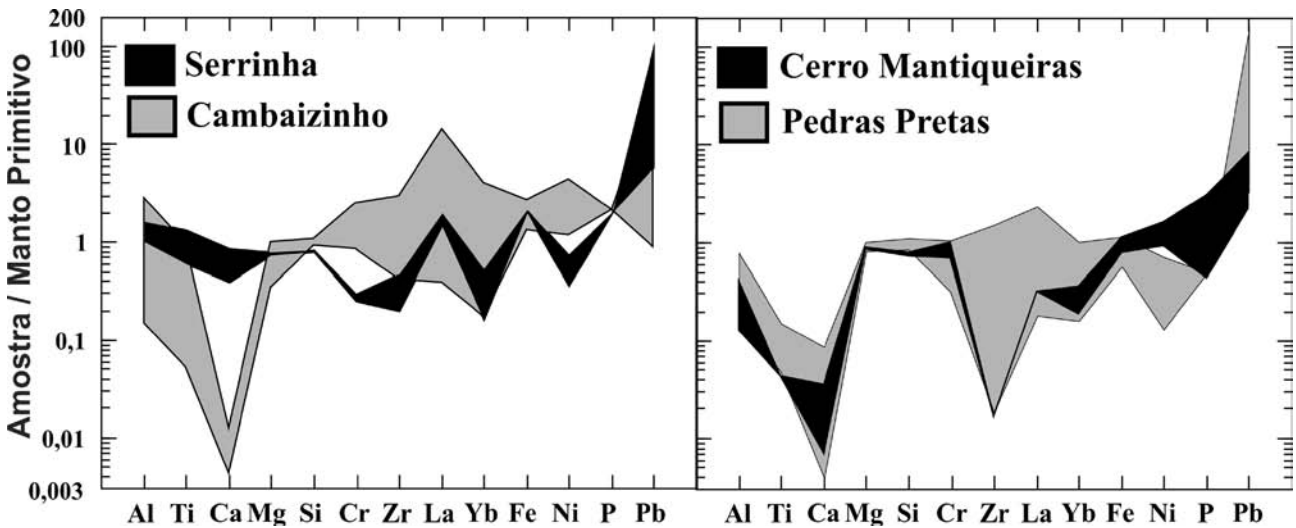


Figura 5. Variações da concentração de alguns elementos químicos representativos nas unidades de rochas ultramáficas abrangidas por este estudo (Tabelas 1 e 2) em relação ao manto primitivo idealizado por McDonough e Sun (1995).

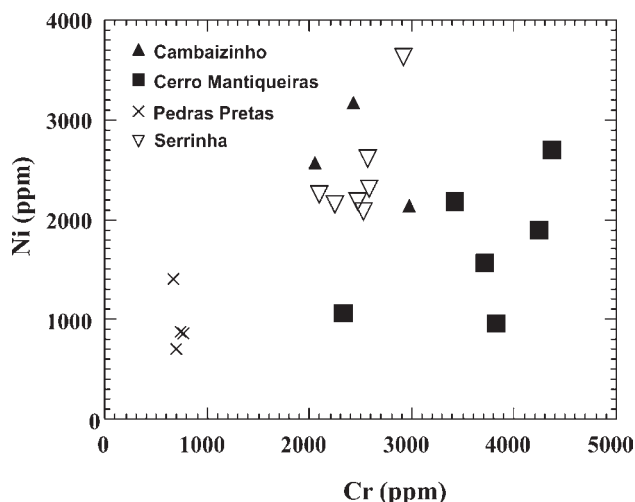


Figura 6. Distribuição do Ni (ppm) e do Cr (ppm) e a tendência de maior concentração de Cr nas rochas do Cerro Mantiqueiras, e teores equivalentes de Ni e Cr no Serrinha e Cambaizinho. O Pedras Pretas apresenta comportamento distinto, com teores relativamente mais baixos de Ni e Cr.

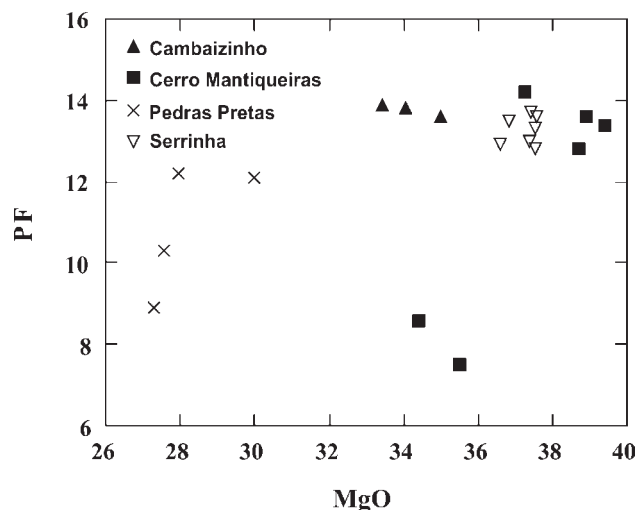


Figura 7. Tendência de correlação positiva entre o teor de MgO e a perda ao fogo (PF). Os resultados obtidos com o Maciço Pedras Pretas mostram um comportamento distinto com teores em MgO mais baixos.

possibilidade de duas populações de olivinas (Figura 9), o primeiro grupo com menor participação do ferro na molécula de Fe atingindo valores em torno de $Fe_{0,2}$ e o segundo grupo com $Fe_{0,5}$. Em relação ao conteúdo de níquel nas olivinas analisadas, observa-se que a Sequência Cerro Mantiqueiras e o Complexo Pedras Pretas possuem uma tendência de variação mais acentuada, com um teor de NiO nas amostras do Maciço Pedras Pretas apresentando o menor valor médio, em torno de 0,17% (Tabela 3), enquanto as olivinas da Sequência Cerro Mantiqueiras apresentaram as maiores concentrações, atingindo até 0,44% (Tabela 3). As olivinas do Complexo Cambaizinho apresentaram intervalo de variação composicional do níquel menor e concentrações médias com valores intermediários em relação às unidades ultramáficas do ESrg (0,21% de NiO em média).

Quanto à participação do manganês nas olivinas, observa-se que as análises oriundas do Maciço Pedras Pretas são relativamente mais enriquecidas (Figura 10), com valor médio de 0,30% de MnO . As mais empobrecidas são as olivinas do Complexo Cambaizinho, com valor médio de 0,10%. Embora a participação do cromo seja pequena nas olivinas em todas as unidades ultramáficas (Cr_2O_3 menor que 0,10%), a tendência observada na rocha se reflete nas olivinas, como ocorre no Maciço Pedras Pretas, que apresenta a menor concentração em cromo (Figura 10).

No Complexo Serrinha foram identificadas as serpentinhas nas variedades crisotilo, antigorita e lizardita. Subtraindo-se prováveis imprecisões analíticas, as análises feitas sobre esses polimorfos (Tabela 4) não estabeleceram diferenças significativas entre as variedades (Figura 11), tendo o crisotilo uma tendência

de obter teores mais elevados em NiO. A Figura 12 compara os teores de NiO nas olivinas e nas serpentinhas de cada unidade ultramáfica, com exceção do Complexo Serrinha, devido à não identificação da olivina. As serpentinhas da Sequência Cerro Mantiqueiras destacam-se das demais devido à ampla variação no teor de NiO (valor médio de 0,28%), inclusive com análises atingindo teores mais elevados aos que foram determinados diretamente nas olivinas. O Complexo Cambaizinho também se destaca por uma tendência de enriquecimento da concentração de NiO da olivina para a serpentina associada, passando de um valor médio de 0,21%, determinado na olivina, para 0,31% na serpentina. O conjunto de análises do Maciço Pedras Pretas apresentou leve tendência de diminuição do NiO com a serpentinização (Figura 12). Da mesma forma que nas olivinas do Maciço Pedras Pretas, também repete-se nas serpentinhas a maior concentração de Fe_2O_3 (12%), enquanto as análises de serpentinhas nas demais unidades ultramáficas apresentam teores menores em Fe_2O_3 e maiores concentrações em MgO (Figura 13).

Comparando a química mineral das olivinas das unidades ultramáficas do ESrg com a composição de olivinas representativas de rochas ultramáficas de outras regiões do mundo (Tabela 5), observa-se grande similaridade composicional quanto aos teores dos principais elementos analisados nas unidades do ESrg. A participação do níquel nas olivinas das principais unidades ultramáficas do ESrg são comparáveis aos observados em olivinas de outros maciços ultramáficos, sendo que os valores obtidos na Sequência Cerro Mantiqueiras são equivalentes aos maiores teores medidos em olivinas de outros continentes (Figura 14), como as olivinas do complexo

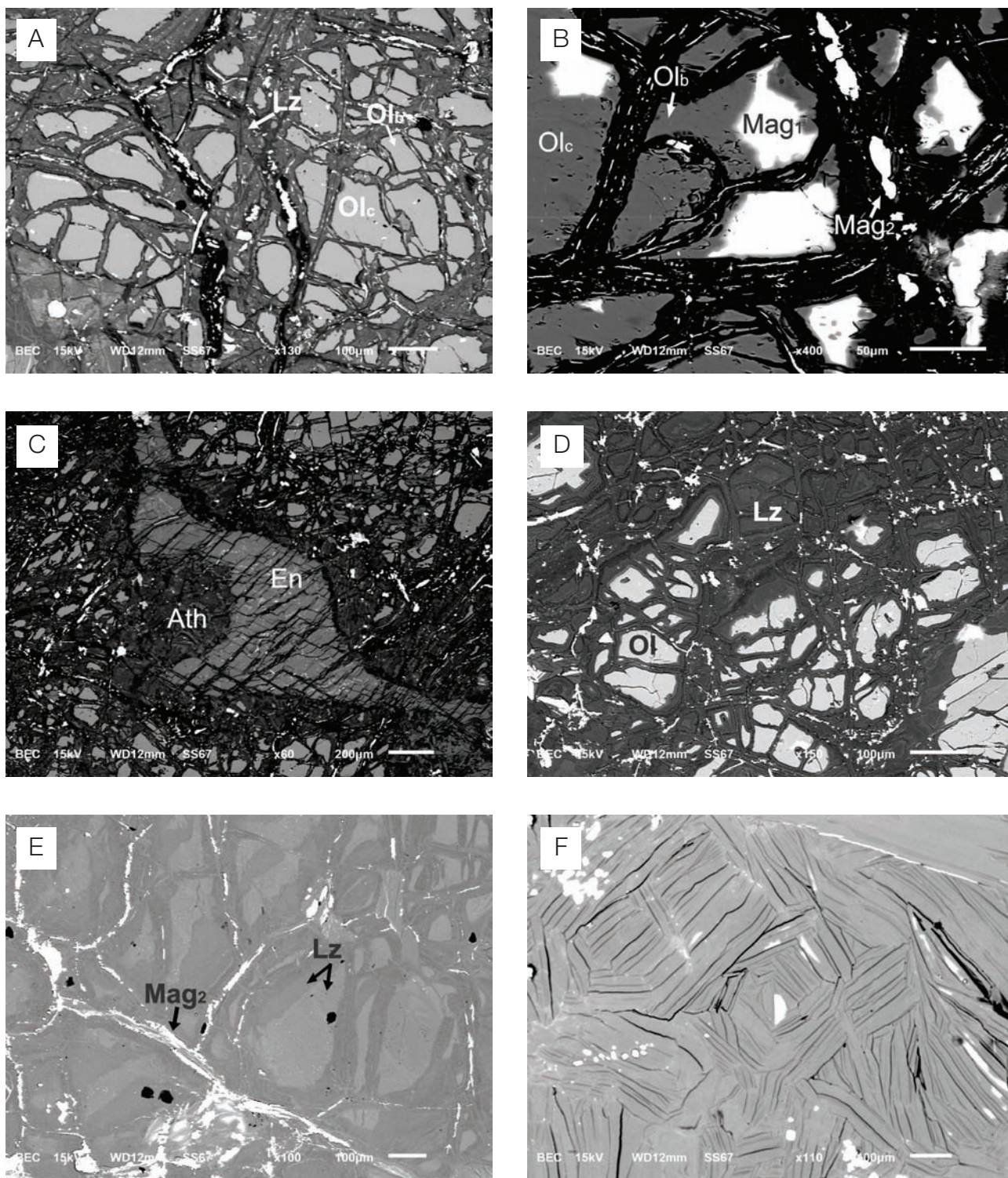


Figura 8. Imagens de BSE. Maciço Pedras Pretas em (A) detalhe das análises realizadas no centro (Ol_c) e borda (Ol_b) da olivina e ocorrência da lizardita (Lz); (B) detalhe das análises realizadas no centro (Ol_c) e borda (Ol_b) da olivina e da ocorrência de magnetita primária (Mag_1) e secundária (Mag_2); (C) textura de substituição da enstatita (En) pela antofilita (Ath). Sequência Cerro Mantiqueiras em (D) textura *mesh* entre a olivina (Ol) e a olivina substituída por lizardita (Lz). Serrinha em (E) textura *mesh* preservada na olivina metamórfica substituída por lizardita (Lz) e detalhe dos veios preenchidos por magnetita (Mag_2); (F) textura lamelar e fibrosa da antigorita.

Tabela 3. Composição química média das olivinas das unidades ultramáficas do RS.

Amostra Mineral	Cerro Mantiqueiras	Pedras Pretas		Cambaizinho
	Olivina	Olivina c	Olivina b	Olivina
Análises (nt)	50	39	41	23
SiO ₂	39,73	35,73	35,26	39,92
TiO ₂	0,01	0,02	0,02	nd
Al ₂ O ₃	0,03	0,01	0,12	nd
FeO	11,83	21,18	20,72	12,17
MnO	0,18	0,29	0,28	0,13
MgO	47,65	41,23	39,96	46,97
CaO	0,01	0,01	0,02	0,02
Na ₂ O	nd	0,01	0,01	nd
K ₂ O	nd	0,01	0,01	nd
Cr ₂ O ₃	0,01	0,01	0,01	0,02
NiO	0,35	0,16	0,17	0,21
NiO (mínimo)	0,24	0,08	0,08	0,17
NiO (máximo)	0,44	0,24	0,29	0,30
Si	0,987	0,946	0,952	0,996
Mg	1,766	1,627	1,608	1,746
Fe	0,246	0,469	0,468	0,254
Ni	0,007	0,003	0,004	0,004
Cátions (soma)	3,012	3,054	3,045	3,004
Mg/(Fe+Mg)	0,88	0,78	0,77	0,87
Mg/(Fe+Mg) (mínimo)	0,87	0,76	0,73	0,84
Mg/(Fe+Mg) (máximo)	0,88	0,78	0,81	0,92

Conteúdo de Fo [Mg/(Fe+Mg)]. Olivina c: análise de centro; Olivina b: análise de borda; nd: não detectado; nt: número total de análises. As fórmulas das olivinas foram calculadas em função do número fixo de 4 átomos de oxigênios.

ofiolítico da Ilha de Leka, Noruega, com até 0,42%. Ao mesmo tempo, as análises das olivinas dos peridotitos tectônicos e de olivinas metamórficas do ofiolito de Preston Peak, Califórnia, apresentam valores relativamente baixos, entre 0,1 e 0,2%, de NiO. As análises em olivinas primárias e metamórficas de serpentinitos do Complexo de Chugokun, distrito leste do Japão, apresentaram teores entre 0,38 e 0,40% de NiO. Comparando as análises de NiO citadas com as análises em olivinas associadas a depósitos de níquel laterítico, observa-se uma tendência dos teores de NiO serem originalmente mais elevados nas olivinas dos peridotitos parcialmente serpentinizados da Mina de Falcondo, na República Dominicana, atingindo 0,46%, e em peridotitos do complexo ofiolítico de Cauca, na região do Cerro Matoso, Colômbia, com até 0,43% de NiO.

As análises de serpentinas quando comparadas a exemplos mundiais (Tabela 6, Figura 15) estabelecem um comportamento similar ao observado com as olivinas. Os teores de NiO das antigoritas dos serpentinitos provenientes de algumas localidades do Egito (Wadi umm Esh el-Zarga, Wadi Beintan e Gebel el-Rubshi) são relativamente baixos (0,16%), assim como os teores de NiO das antigoritas associadas aos harzburgitos de Leka, com 0,16%. Esses teores são similares aos teores de NiO analisados na antigorita do Complexo Serrinha (0,1%). Tanto os teores de NiO dos

crisotilos analisados no serpentinito de Wadi Badia (Egito), com média de 0,24%, quanto os valores dos serpentinitos Tehuizingo do Complexo de Acatlán (México), com média de 0,27%, são maiores do que os valores de NiO nas antigoritas. Os valores obtidos no crisotilo do serpentinito do Complexo Cambaizinho (0,4%) e na Serrinha (0,3%) são mais elevados do que os valores apresentados na Tabela 5.

A mesma tendência observada nas variedades de serpentina analisadas é verificada nos dados de referência, com teores de níquel sendo em geral menores nas lizarditas do que os verificados nos crisotilos. As lizarditas dos serpentinitos do complexo ofiolítico de Mayarí-Baracoa (Cuba) tem, em média, 0,17% em NiO, e as lizarditas do serpentinito do complexo de Chugokun (Japão), 0,14%, valores aproximados quando comparados com os teores de 0,18% de NiO nas lizarditas do harzburgito serpentizado de Cassiar (Canadá), e com os teores de 0,2% de NiO nas lizarditas dos serpentinitos de Tehuizingo (Noruega). Os valores observados nos exemplos anteriores são similares quando comparados aos obtidos nas serpentinas do ESrg (Figura 15), com destaque para os valores obtidos na Sequência Cerro Mantiqueiras e no Complexo Cambaizinho, equivalentes, ou até mesmo mais elevados, do que os observados em outros maciços ultramáficos serpentinizados de outros continentes.

Tabela 4. Composição química média das serpentinas das unidades ultramáficas do ESrs.

Amostra Mineral	Cambaizinho			Serrinha		Cerro Mantiqueiras	Pedras Pretas
	Lizardita	Crisotilo	Antigorita	Lizardita	Crisotilo	Lizardita	Lizardita
Análises (nt)	37	3	5	38	13	39	35
SiO ₂	43,69	42,65	39,29	40,26	44,00	42,54	37,53
TiO ₂	0,02	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02	0,05
Al ₂ O ₃	1,06	0,11	7,68	1,87	0,05	0,93	1,93
Cr ₂ O ₃	0,27	0,05	0,97	0,23	0,02	0,06	0,01
Fe ₂ O ₃	2,50	7,66	3,34	2,35	1,72	2,99	12,78
MnO	0,02	0,05	0,03	0,05	0,07	0,08	0,19
MgO	41,38	37,56	35,73	38,52	37,37	39,05	32,17
NiO	0,34	0,45	0,18	0,29	0,32	0,24	0,10
CaO	0,04	0,08	0,02	0,02	0,56	0,02	0,61
Na ₂ O	0,01	0,02	0,01	nd	0,01	0,01	0,15
K ₂ O	0,01	0,02	nd	nd	0,01	0,01	0,02
Total	89,28	88,68	87,29	83,61	84,14	85,95	85,55
H ₂ O*	10,72	11,32	12,71	16,39	15,86	14,05	14,45
NiO (mínimo)	0,04	0,37	0,08	0,14	0,07	0,04	0,01
NiO (máximo)	0,48	0,49	0,30	0,96	0,41	0,48	0,26
Si	1,980	1,980	1,819	1,952	2,097	1,998	1,853
AlIV	0,033	0,003	0,222	0,058	0,001	0,026	0,053
AlVI	0,025	0,003	0,208	0,046	0,002	0,026	0,054
Fe ₃	0,086	0,269	0,117	0,086	0,062	0,104	0,475
Ni	0,010	0,020	0,010	0,010	0,010	0,010	nd
Mn	0,001	0,002	0,001	0,002	0,003	0,003	0,008
Mg	2,795	2,599	2,475	2,783	2,651	2,751	2,367
Cátions	4,944	4,882	4,887	4,949	4,869	4,923	4,860
Mg/(Fe+Mg)	0,97	0,91	0,96	0,97	0,97	0,96	0,83

Conteúdo de Fo [Mg/(Fe+Mg)]. H₂O: cálculo inferido da molécula de água; AlIV: alumínio na posição tetraédrica; AlVI: alumínio na posição octaédrica; nd: não detectado; nt: número total de análises. As fórmulas das serpentinas foram calculadas com base em 9 oxigênios e 4 grupos OH.

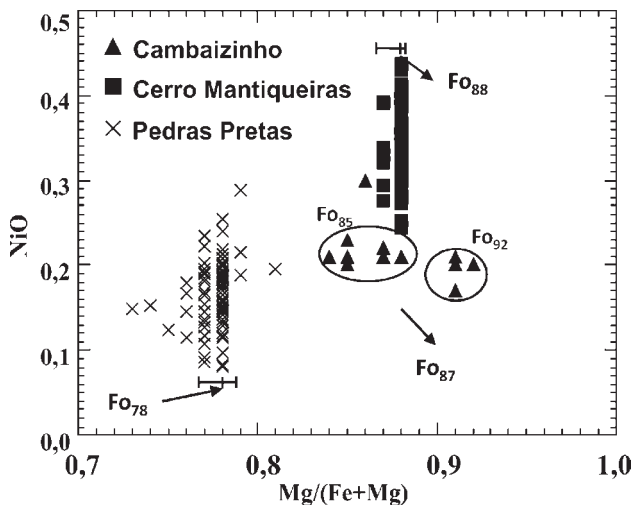


Figura 9. Distribuição das análises de olivinas em função da molécula de Fo, segundo a razão Mg/(Fe+Mg) e da concentração de NiO. Linhas representativas do intervalo de variação com o valor modal de Fo de cada população. Os teores de NiO tendem a se elevar nas olivinas da Sequência Cerro Mantiqueiras.

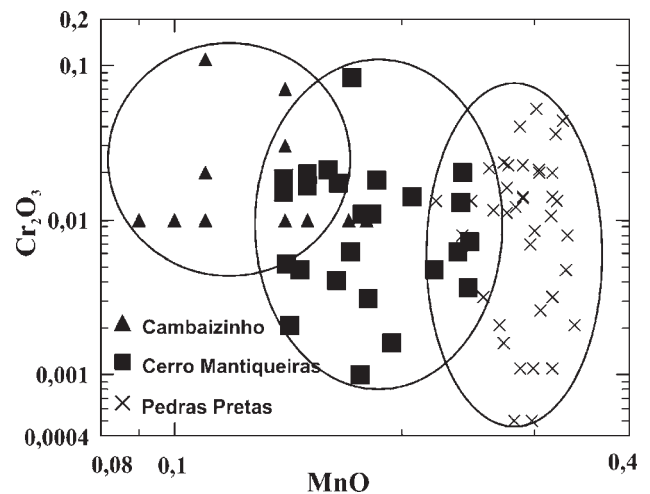


Figura 10. Concentrações de MnO e Cr₂O₃ nas olivinas analisadas. Os maiores teores em MnO e menores em Cr₂O₃ ocorrem no Complexo Pedras Pretas.

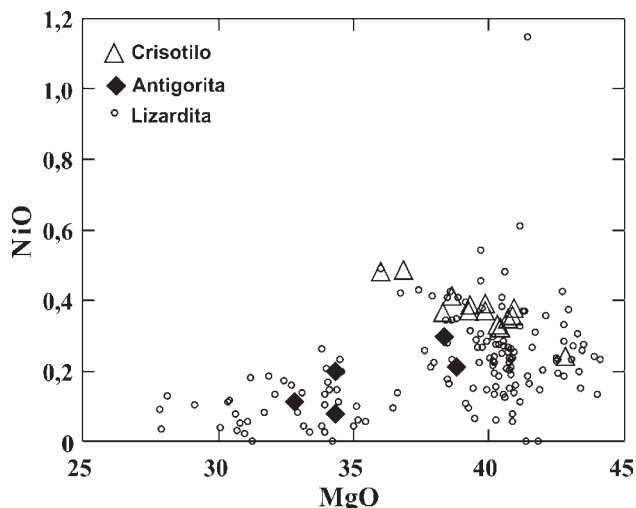


Figura 11. Diagrama de dispersão NiO – MgO para os polimorfos de serpentinas do Complexo Serrinha. Variedades de lizardita e especialmente o crisotilo tendem a apresentar teores mais elevados em níquel.

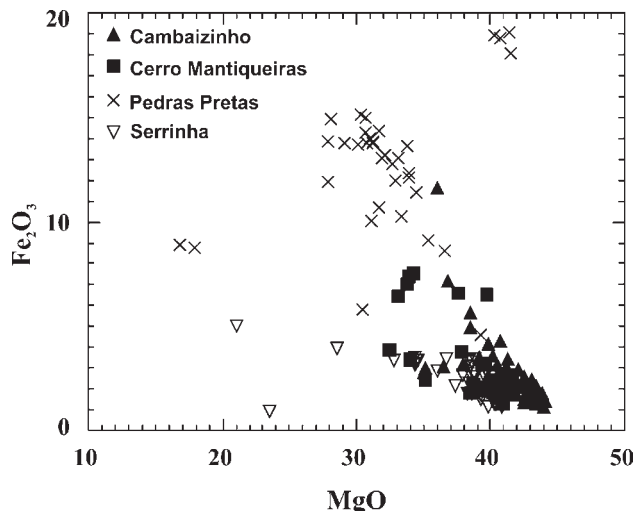


Figura 13. Diagrama de dispersão Fe₂O₃ – MgO nas serpentinas das unidades ultramáficas estudadas. O teor em Fe₂O₃ é maior nas serpentinas (lizarditas) do Maciço Pedras Pretas.

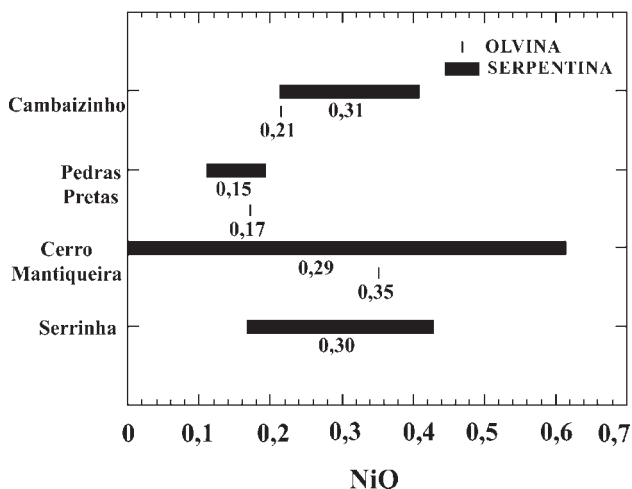


Figura 12. Diagrama comparativo entre os valores médios e dos intervalos de variação (1 desvio-padrão em relação ao valor médio) dos teores de níquel nas olivinas e respectivas serpentinas.

DISCUSSÃO

As unidades ultramáficas tipo Serrinha e Cambaizinho contêm evidências de um processo evolutivo mais complexo, com fases de serpentinização e de metamorfismo recorrentes, inclusive com a substituição total das olivinas por serpentinas (Complexo Serrinha) e com a reconstituição da olivina a partir das serpentinas dentro do campo do metamorfismo regional. Em termos petrográficos e químicos, o Maciço Pedras Pretas é considerado uma unidade mais preservada que as demais, contendo rochas com mineralogia e texturas

ígneas, apresentando os maiores valores de FeO e os menores de MgO e PF. Ao contrário, nos complexos Cambaizinho e Serrinha foram identificadas texturas e mineralogia predominantemente metamórficas, devido à intensa serpentinização dos protólitos em um sistema com maior disponibilidade de água, como a textura *jackstraw* da olivina metamórfica e os maiores valores de MgO e PF. A Sequência Cerro Mantiqueiras merece mais investigações, pois ainda preserva resquícios de mineralogia e texturas ígneas do protólito, apesar da ocorrência de diferentes estágios de serpentinização.

Os resultados de análises com microsonda eletrônica indicam que as olivinas dos peridotitos do Maciço Pedras Pretas possuem baixos teores de NiO, na média, de 0,17%, enquanto as olivinas dos harzburgitos da Sequência Cerro Mantiqueiras possuem teores de NiO maiores, na média de 0,31%. As olivinas do Maciço Pedras Pretas e da Sequência Cerro Mantiqueiras possuem uma estreita variação composicional no conteúdo de forsterita, porém, os teores de níquel variam amplamente, indo de 0,08 a 0,29% nas olivinas do Pedras Pretas, atingindo níveis mais elevados (0,24 até 0,44%) nas olivinas da Sequência Cerro Mantiqueiras. No Complexo Cambaizinho as olivinas tendem a ser mais magnesianas e, portanto, integralmente metamórficas, porém, com teores médio de níquel em torno de 0,21% (máximo de 0,3%). Mesmo assim são mais elevados que o valor determinado para o Maciço Pedras Pretas, cujas olivinas ainda preservam a condição de formação através da cristalização magmática. Comparando-se o teor de níquel nas olivinas e nas serpentinas de cada unidade ultramáfica estudada percebem-se dois comportamentos distintos. Em algumas unidades ultramáficas a concentração tende a aumentar das olivinas para as serpentinas (Complexo Cambaizinho e Sequência Cerro Mantiqueiras) e, em outras, tende a diminuir, como é

Tabela 5. Composição química de olivinas de outras ocorrências, com diversas origens, utilizadas como elementos de comparação com as olivinas analisadas das unidades ultramáficas do Rio Grande do Sul.

Referência	Snoke	Snoke	Iyer	Iyer	Iyer	Nozaka	Nozaka	Galí	Gleeson
	1978	1978	2008	2008	2008	2003	2003	2012	2004
Local	Califórnia	Califórnia	Noruega	Noruega	Noruega	Japão	Japão	Rep.Dom.	Colômbia
Amostra	Per. Tect.	OI. Tlc. Ult.	Harz.	Dun.	Weh.	Serp.	Serp.	Ni lat.	Ni lat.
Mineral	OI	OI m	OI	OI	OI	OI m	OI	OI	OI
SiO ₂	40,40	40,60	40,26	40,78	38,97	40,64	40,79	40,94	40,92
TiO ₂	nd	nd	0,02	nd	nd	nd	nd	0,02	0,08
Al ₂ O ₃	nd	nd	0,02	0,02	nd	nd	nd	nd	0,07
FeO	9,90	10,50	9,78	10,65	18,07	10,25	9,03	9,23	8,98
MnO	0,18	1,16	0,26	0,23	0,43	0,19	0,13	0,17	0,14
MgO	49,00	48,90	48,46	48,18	42,62	49,13	49,98	49,81	48,62
CaO	0,05	0,03	0,04	0,04	0,02	0,02	0,01	nd	0,16
Na ₂ O	nd	nd	nd	nd	0,03	nd	nd	nd	0,04
K ₂ O	nd	nd	0,02	nd	0,02	nd	nd	nd	0,03
Cr ₂ O ₃	nd	nd	nd	0,01	0,07	nd	nd	0,01	0,07
NiO	0,20	0,10	0,42	0,30	0,21	0,40	0,38	0,46	0,43
Total	99,73	101,29	99,28	100,21	100,44	100,63	100,32	100,64	99,54
Si	0,994	0,990	0,996	1,002	0,991	0,994	0,994	0,996	1,005
Fe	0,204	0,214	0,202	0,219	0,384	0,210	0,184	0,188	0,184
Mn	0,004	0,024	0,005	0,005	0,009	0,004	0,003	0,004	0,003
Mg	1,798	1,778	1,788	1,765	1,616	1,791	1,817	1,807	1,780
Ca	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	nd	nd	0,004
Ni	0,004	0,002	0,008	0,006	0,004	0,008	0,007	0,009	0,009
Cátions	3,005	3,009	3,002	2,999	3,007	3,008	3,005	3,004	2,992
Mg/(Fe+Mg)	0,90	0,89	0,90	0,89	0,81	0,90	0,91	0,91	0,91

OI m: olivina metamórfica; Per. Tect.: peridotito tectônico; OI. Tlc. Ult.: olivina talco ultramafito; Harz.: harzburgito; Dun.: dunito; Weh.: Werhlito; Serp.: serpentinito; Rep. Dom.: República Dominicana; Ni lat.: níquel laterítico; nd: não detectado. As fórmulas das olivinas foram calculadas em função do número fixo de 4 átomos de oxigênios.

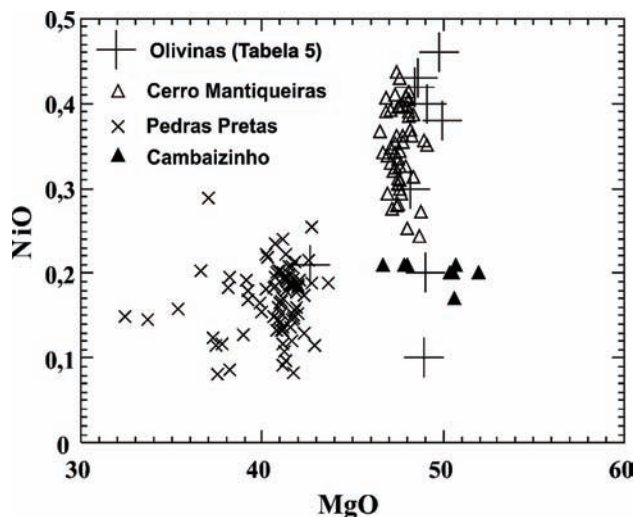


Figura 14. Comparação dos teores de níquel em olivinas de referência (Tabela 5) com os observados nas unidades ultramáficas do ESrg e analisadas neste estudo.

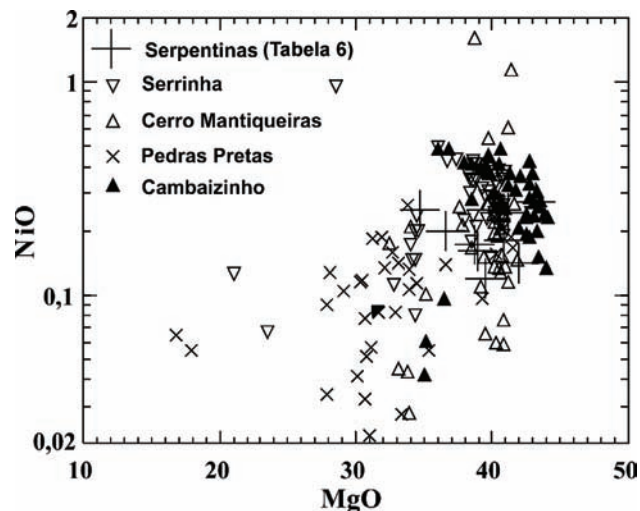


Figura 15. Comparação dos teores de níquel em serpentinas de referência (Tabela 6) com os observados nas unidades ultramáficas do ESrg e analisadas neste estudo.

Tabela 6. Composição química de serpentinas de outras ocorrências, com diversas origens, utilizadas como elementos de comparação com as serpentinas analisadas nas unidades ultramáficas do Rio Grande do Sul.

Referência	Azer 2005	Azer 2005	Mancera 2009	Mancera 2009	O'Hanley 1993	Nozaka 2003	Quintero 2012	Quintero 2012	Iyer 2008
Local	Egito	Egito	México	México	Canadá	Japão	Cuba	Cuba	Noruega
Amostra	Serp.	Serp.	Serp.	Serp.	Serp.	Serp.	Serp.	Serp.	Harz.
Mineral	Atg	Clt	Clt	Lz	Lz	Lz	Atg	Lz	Atg
SiO ₂	43,99	46,04	42,75	41,22	40,76	43,59	41,58	42,80	44,22
TiO ₂	nd	nd	0,02	0,01	nd	nd	0,02	0,03	0,02
Al ₂ O ₃	0,79	0,33	0,01	2,47	2,22	0,32	2,66	2,50	1,07
Cr ₂ O ₃	0,05	0,03	0,06	0,12	0,29	nd	0,58	0,25	0,10
Fe ₂ O ₃	3,64	0,78	1,12	6,94	2,18	1,37	7,08	3,23	2,58
MnO	0,07	nd	0,05	0,04	0,05	0,05	nd	0,06	0,09
MgO	38,91	41,22	43,14	36,61	40,88	42,01	34,74	38,67	39,52
NiO	0,16	0,24	0,27	0,20	0,18	0,14	0,25	0,17	0,12
CaO	0,08	nd	0,01	nd	nd	0,29	nd	0,01	nd
Na ₂ O	nd	0,02	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,01
K ₂ O	0,02	0,01	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,01
Total	87,71	88,67	87,43	87,61	86,56	87,77	86,91	87,72	87,74
H ₂ O	12,29	11,33	12,57	12,39	13,44	12,23	13,09	12,28	12,26
Si	2,028	2,076	1,976	1,929	1,910	2,002	1,959	1,973	2,030
AlIV	nd	0,000	0,001	0,071	0,090	nd	0,041	0,027	nd
Fe ₃	0,126	0,026	0,039	0,244	0,077	0,047	0,251	0,112	0,089
Cr	0,002	0,001	0,002	0,004	0,011	nd	0,022	0,009	0,004
Ni	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	nd
Mn	0,003	nd	0,002	0,002	0,002	0,002	nd	0,002	0,003
Mg	2,674	2,771	2,972	2,554	2,856	2,877	2,440	2,657	2,704
Mg/(Fe+Mg)	0,960	0,990	0,990	0,910	0,970	0,980	0,910	0,960	0,970

Atg: antigorita; Clt: crisotilo; Lz: lizardita; Serp.: serpentinito; Harz.: harzburgito; nd: não detectado. As fórmulas das serpentinas foram calculadas com base em 9 oxigênios e 4 grupos OH.

exemplificado pelo Maciço Pedras Pretas. Estudos mais detalhados estão sendo realizados para avaliar este comportamento, com especial interesse para a influência dos eventos identificados e para a variedade de serpentina associada.

CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitiram caracterizar a mineralogia, as texturas e, quimicamente, as diferentes unidades ultramáficas estudadas. Inicialmente, os resultados atestam a complexidade dos processos atuantes nessas rochas e a importância de seguir com estudos multidisciplinares para melhorar a compreensão do modelo de disponibilização do níquel. Notadamente, o primeiro requisito para a formação de jazidas supergênicas é a concentração original do elemento de interesse na rocha. Nos maciços ultramáficos com baixa atividade do enxofre tem-se que o mineral primário hospedeiro do níquel é a olivina. O teor de níquel nessas rochas tende a ser um aspecto relacionado à composição original do magma, que proporcionará a geração de olivinas com maior ou menor participação do níquel. A transformação das

olivinas em serpentinas é um processo universal e, neste ponto, ainda existem várias dúvidas sobre a acomodação do níquel nessas novas estruturas cristalinas, sendo que as rochas ultramáficas do ESrg são promissoras para o estudo desta temática.

Os dados de química mineral de olivinas e serpentinas compilados da bibliografia internacional mostram que as concentrações de NiO apresentados por diversos autores são condizentes com as concentrações destes minerais no ESrg, obtidos nesta pesquisa. Demonstram também que as análises de olivinas realizadas em amostras de depósitos lateríticos de níquel (Gleeson, 2004; Galí, 2012) atingem valores superiores, chegando a níveis de 0,50%, comparáveis ao determinado para as olivinas da Sequência Cerro Mantiqueiras no ESrg.

Conclui-se que nas unidades ultramáficas do ESrg estudadas, os teores de níquel na rocha e nos principais minerais hospedeiros, como a olivina e as serpentinas, são equivalentes aos níveis encontrados normalmente em complexos ultramáficos de outros continentes. Os dados estabelecem que a possibilidade de os teores mais baixos de níquel ocorrerem nas rochas ultramáficas do ESrg, sendo o principal fator limitante para a

formação de níquel silicatado, não condiz com os valores encontrados nas rochas e nos minerais hospedeiros deste elemento. No ESrg ocorrem processos modificadores da rocha original, com alto potencial para redistribuir o níquel, podendo acarretar o empobrecimento ou o enriquecimento deste elemento na rocha total e na escala mineral. Esta pesquisa é conduzida para avaliar algumas unidades ultramáficas do ESrg e, desse modo, demonstra que o NiO enriquece nas serpentinas em relação às olivinas precursoras do Complexo Cambaizinho e da Sequência Cerro Mantiqueiras, com distribuição de teores irregulares em algumas serpentinas desta última sequência. Ao contrário, no Maciço Pedras Pretas, as serpentinas mostram um padrão de empobrecimento relativo em NiO em relação às olivinas. Constatou-se que as unidades passaram por eventos distintos, concluindo-se que a distribuição do Ni nas rochas ultramáficas do ESrg deve ser avaliada isoladamente em cada unidade. No Complexo Serrinha e no Maciço Pedras Pretas, quando comparados com a composição esperada do manto primitivo, observa-se um empobrecimento do níquel, que, na primeira unidade, pode estar relacionado a eventos metamórficos e metassomáticos e, na segunda, à forte possibilidade de cristalização fracionada, corroborado com a constatação da baixa concentração de cromo no Maciço Pedras Pretas.

Levando em consideração apenas o fator concentração de níquel nas rochas e nas olivinas, admite-se como um aspecto importante deste estudo a determinação da maior potencialidade da Sequência Cerro Mantiqueiras. Os teores de níquel nessas rochas são comparáveis aos encontrados em rochas ultramáficas geradoras de jazidas silicatadas no mundo, tendo-se indícios da presença de olivinas com assinatura ígnea em alguns corpos da sequência. Por outro lado, as interpretações sugerem que a falta do registro de ocorrências econômicas de níquel muito provavelmente seria causada por fatores como a recorrência no tempo e no espaço de eventos de deformação e metamorfismo, que propiciaram a mobilização do níquel nesta sequência. Não menos importante, outro motivo estaria no conjunto dos processos supergênicos, em especial na ausência de um clima tropical úmido atuante por um longo período de tempo.

AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelo uso dos laboratórios ligados ao Centro de Estudos Costeiros e ao Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica (CPGq), do Instituto de Geociências. Este trabalho teve auxílio financeiro da CAPES, FAPERGS e CNPQ.

REFERÊNCIAS

- Azer, M. K., Khalil, A. E. S. (2005). Petrological and mineralogical studies of Pan-African serpentinites at Bir Al-Edeid área, central Eastern Desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 43(5), 525-536.
- Babinski, M., Chemale Jr, F., Hartmann, L. A., Van Schmus, W. R., Silva, L. C. (1996). Juvenile accretion at 750 – 700 Ma in Southern Brazil. *Geology*, 24(5), 439-442.
- Butt, C. R. M., Cluzel, D. (2013). Nickel Laterite Ore Deposits: Weathered Serpentinites. *Elements*, 9 (2), 123-128.
- Coleman, R. G. (1977). *Ophiolites: ancient oceanic lithosphere?* Nova York: Springer.
- D'ávila, R. S. F., Strieder, A. J., Hartmann, L. A., Loss, E. L. (1985). Reavaliação de Alguns Aspectos Petroológicos e Geoquímicos do Complexo Básico-Ultrabásico Pedras Pretas (RS), Florianópolis. *II Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia*, 277 - 286. Florianópolis: SBG.
- Deer, W. A., Howie, R. A., Zussman, J. (1997). *Rock-Forming Minerals, Orthosilicates* (v. 1). London: Geological Society.
- Evans, B. W. (2010). Lizardite versus antigorite serpentinite: Magnetite, hydrogen, and life (?). *Geology*, 38(10), 879-882.
- Evans, B. W., Trommsdorff, V. (1974). Stability of enstatite + talc and CO₂ metasomatism of metaperidotite, Val d'Efra, Lepontine Alps. *American Journal Society*, 274(3), 274-296.
- Galí, S., Soler, J. M., Proenza, J. A., Lewis, J. F., Cama, J., Tauler, E. (2012). Ni enrichment and stability of Al-free garnierite solif-solutions: a thermodynamic approach. *Clays and Clay minerals*, 60(2), 121-135.
- Gleeson, S. A., Herrington, R. J., Durango, J., Velásquez, C. A., Koll, G. (2004). The mineralogy and geochemistry of the Cerro Matoso S.A. Ni laterite deposit, Montelíbano, Colombia. *Economic Geology*, 99(6), 1197-1213.
- Hallberg, J. A. (1985). Geology and mineral deposits of the Leonora-Laverton area, Northeastern Yilgarn Block, Western Australia. Western Australia: Hesperian Press.
- Hartmann, L. A., Chemalle Jr, F. (2003). Mid amphibolite facies metamorphism of harzburgites in the neoproterozoic Cerro Mantiqueiras Ophiolite, Southern most Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 75(1), 109-128.

- Hartmann, L. A., Nardi, L. V. S., Formoso, M. L. L., Remus, M. V. D., Lima, E. F., Mexias, A. S. (1999). Magmatism and metallogeny in the crustal evolution of Rio Grande do Sul shield, Brazil. *Pesquisas em Geociências*, 26(2), 45-63.
- Hartmann, L. A., Philipp, R. P., Santos, J. O. S., McNaughton, N. J. (2007). Time frame of 753 – 680 Ma juvenile accretion during the São Gabriel orogeny, southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 19(1), 84-99.
- Hartmann, L. A., Remus, M. V. D. (2000). Origem e Evolução das rochas ultrabásicas do Rio Grande do Sul desde o Arqueano até o Cambriano. In: M. Holtz, L. F. de Ros (Eds.), *Geologia do Rio Grande do Sul*. (v. 1, 53-78). Porto Alegre: UFRGS.
- Iyer, K., Austrheim, T., John, T., Jamtveit, B. (2008). Serpentinization of the oceanic lithosphere and some geochemical consequences: constraints from the Leka Ophiolite Complex, Norway. *Chemical Geology*, 249(1-2), 66-90.
- Jensen, L. S. (1976). A new method of classifying subalkalic volcanic rocks. *Miscellaneous Paper Ontario Divisions Mines*, 66, 0-22.
- Jost, H., Hartmann, L. A. (1984). Província Mantiqueira–Setor Meridional. In: F. F. M. Almeida, Y. Hasui (coord.), *O Pré-Cambriano do Brasil*. São Paulo.
- Leite, J. A. D. (1997). *A origem dos harzburgitos da Sequência Cerro Mantiqueiras e implicações tectônicas para o desenvolvimento do Neoproterozóico na Porção Oeste do Escudo Sul-riograndense*. Tese (Doutorado). Porto Alegre: Instituto de Geociências – UFRGS.
- Mancera, G. G., Gutiérrez, F. O., Proenza, J. A., Atudorei, V. (2009). Petrology and geochemistry of Tehuiztingo serpentinites (Acatlán Complex, SW Mexico). *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 61(3), 419-435.
- McDonough, W. F., Sun, S. (1995). The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120, 223-253.
- Menegotto, E. (1982). *Alteração intempérica de rochas ultrabásicas em clima subtropical, evolução mineralógica e geoquímica em alguns maciços ultrabásicos do rio grande do Sul-Brasil*. Tese (Doutorado). Porto Alegre: Instituto de Geociências – UFRGS.
- Melfi, A. J., Trescases, J. J., Carvalho, A., Oliveira, S. M. B., Ribeiro Filho, E., Formoso, M. L. L., (1988). The Lateritic Ore Deposits of Brazil. *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 41(1), 5-36.
- Nesbitt, R. W., Hartmann, L. A. (1986). Comments on ‘a peridotitic komatiite from the dalradian of shetland’, by D. Flinn and D. T. Moffat. *Geological Journal*, 21, 201-205.
- Nozaka, T. (2003). Compositional heterogeneity of olivine in thermally metamorphosed serpentinite from Southwest Japan. *American Mineralogist*, 88(8-9), 1377-1384.
- O’Hanley, D. S., Dyar, M. D. (1993). The composition of lizardite 1T and the formation of magnetite in serpentinites. *American Mineral*, 78, 391-404.
- Oliveira S. M. B., Trescases, J. J. (1985). O depósito de níquel de Jacupiranga (SP): Evolução Mineralógica e Geoquímica. *Revista Brasileira de Geociências*, 15(3): 249-254.
- Quintero, B. I. F., Proenza, J. A., García, C. A., Tauler, E., Galí, S. (2011). Serpentinites and serpentinites within a fossil subduction channel: La Corea mélangé, eastern Cuba. *Geologica Acta*, 9(3-4), 389-405.
- Rêgo, I. T. S. (1980). *Complexo Básico-Ultrabásico de Pedras Pretas, Rio Grande do Sul*. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre: Instituto de Geociências – UFRGS.
- Remus, M. V. D. (1990). *Geologia e Geoquímica do Complexo Cambaizinho São Gabriel-RS*. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre: Instituto de Geociências – UFRGS.
- Remus, M. V. D., Hartmann, L. A., Formoso, M. L. L. (1993). Os Padrões de Elementos Terras Raras e a Afinidade Geoquímica Komatiítica dos Xistos Magnesianos e Rochas Associadas do Complexo Cambaizinho, São Gabriel/RS. *Revista Brasileira de Geociências*, 23(4), 370-387.
- Snoke, A. W., Calk, L. C. (1978). Jackstraw-textured talc-olivine rocks, Preston Peak area, Klamath Mountains, California. *Geological Society of America Bulletin*, 89(2), 223-230.
- Trescases, J. J., Melfi, A. J., Oliveira, S. M. B. (1984). Nickeliferous Laterites of Brazil. *Lateritisation Processes*, 170-184.
- Tomazoni, F. N. (2011). *Controles na distribuição das lateritas e saprólitos de alto teor no depósito de níquel laterítico do Jacaré, distrito de Carajás, Brasil*. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre: Instituto de Geociências – UFRGS.
- Vieira, H. M. (1981). *Mineralogia, Petrografia e Geoquímica do Complexo Ultrabásico de Serrinha, São Gabriel, RS*. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre: Instituto de Geociências – UFRGS.
- Wicks, F. J., Whittaker, E. J. W (1977). Serpentine textures and serpentinization. *Canadian Mineralogist*, 15, 459-488.
- Wildner, W., Ramgrab, G. E., Lopes, R. C. da., Iglesias, C. M. F. (2006). *Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul*. Escala. 1:750.000. Porto Alegre: Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais/CPRM.