

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



UFRJ

**DISTRIBUIÇÃO GEOQUÍMICA NO REGOLITO
DO DEPÓSITO DE NÍQUEL LATERÍTICO DE
SANTA FÉ, GO**

MATHEUS LAMAS MACHADO

Rio de Janeiro
Janeiro de 2018



UFRJ

Matheus Lamas Machado

**DISTRIBUIÇÃO GEOQUÍMICA NO REGOLITO
DO DEPÓSITO DE NÍQUEL LATERÍTICO DE
SANTA FÉ, GO**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação em Geologia do Instituto de
Geociências, Universidade Federal do
Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado
como requisito necessário para obtenção
do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Ph.D. Claudio Gerheim
Porto

FICHA CATALOGRÁFICA

Machado, Matheus Lamas

M149d

Distribuição geoquímica no regolito do depósito de níquel laterítico de Santa Fé, GO / Matheus Lamas Machado. Rio de Janeiro, 2018. 62 f.

Orientador: Claudio Gerheim Porto. Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Bacharel em Geologia, 2018.

1. Geoquímica de Exploração .
2. Exploração Mineral.
3. Ni Laterítico.
4. Co Laterítico.
5. Maciço Ultramáfico de Santa Fé.

I. Gerheim Porto, Claudio, orient. II. Título.

Matheus Lamas Machado

**Distribuição geoquímica no regolito do depósito de níquel
laterítico de Santa Fé, GO**

Trabalho de Conclusão de Curso
de Graduação em Geologia do
Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Rio de
Janeiro – UFRJ, apresentado como
requisito necessário para obtenção
do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Ph.D. Claudio
Gerheim Porto

Aprovado em: ____ de Janeiro de 2018

Por:

Orientador: Ph.D. Claudio Gerheim Porto (UFRJ)

D.Sc. Julio Cezar Mendes (UFRJ)

D.Sc. Cícera Neysi de Almeida (UFRJ)

Resumo

LAMAS MACHADO, M. Distribuição geoquímica no regolito do depósito de níquel laterítico de Santa Fé, GO. Ano 2018, p. 62, Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

A região do Brasil Central abriga a Província Alcalina do Sul de Goiás que contém inúmeras intrusões ultramáficas dentre elas o Maciço Ultramáfico de Santa Fé, onde desenvolveram-se durante o cenozóico perfis lateríticos que durante a década de 70 chamaram a atenção para seu potencial para *commodities* como níquel, vermiculita e cobalto. O Maciço de Santa Fé possui idade de aproximadamente 80 Ma (Cretáceo Superior) sendo que 80% de seu terreno é dominado por dunitos serpentinizados, com piroxenitos e peridotitos concentrados nas bordas da intrusão, que se destaca como um relevo positivo circundado por sedimentos devonianos da bacia do Paraná.

Este trabalho tem o objetivo de tratar e interpretar dados geoquímicos de uma extensa base de dados disponibilizada por empresa privada que desenvolveu trabalhos exploratórios para Ni laterítico na área por meio de uma malha de sondagem com 691 furos. Pretende-se descrever o comportamento geoquímico e suas possíveis relações com a mineralogia do minério de Ni e de Co, utilizando informações disponíveis na literatura acerca da geologia da área e da mineralogia do perfil. Utilizando ferramentas *GIS* e geoestatística foi possível traçar relações geoquímicas com os modelos de desenvolvimento de depósitos niquelíferos.

Dentre os fatores controladores da distribuição química do Ni e Co dentro do regolito, destacaram-se: A fisiografia por seu potencial concentrador das fases portadoras do Ni e Co; os litotipos que servem de base para a formação do regolito, devido as variações químicas entre os litotipos e as variações químicas dentro do dunito, que forneceram expressivas variações de Ni e Co dentro do perfil. Observou-se o reflexo das variações mineralógicas diretamente nos resultados geoquímicos plotados em gráficos e em mapa, o que permitiu entender quais os fatores que controlam a evolução do regolito e distribuição do Ni e Co em cada região.

O depósito de Santa Fé apresentou características mistas onde apresenta maior massa de Ni contida no horizonte silicatado, mas também apresentou os maiores teores na região oxidada do perfil, com mediana de teores 60% maiores que a zona silicatada.

Palavras chave: Maciço Ultramáfico de Santa Fé, GO; Níquel Laterítico; Cobalto Laterítico; Geoquímica.

Agradecimentos

Agradeço a toda minha família pelo apoio, amor e carinho, principalmente meus pais Ana Lúcia e Josias por me permitirem concluir a graduação sob condições de conforto, com qualidade e liberdade, agradeço especialmente a confiança.

Agradeço a minha companheira Isabelle Jacob por todo o amor, carinho e suporte, e por ter me ensinado a minha filosofia de vida, que tanto me contribui para uma vida mais plena e feliz.

Agradeço aos meus mais queridos amigos que compartilham dos meus valores e alegrias, e que fazem parte desses 5 anos de história; e aos meus amigos de graduação principalmente minha turma 2013.1, por tantas alegrias durante os campos e convivência dentro da universidade, mas principalmente pelo aprendizado compartilhado, estudos em grupo, dúvidas sanadas e parcerias durante os trabalhos.

Agradeço ao Prof. Porto por ter me recebido com tanta paciência e atenção, pelo projeto apresentado a mim, pela liberdade no trabalho, por todo aprendizado e experiência passados a mim durante esse último ano, e pelas contribuições essenciais para conclusão deste trabalho.

Agradeço aos demais professores que contribuíram com a minha formação durante a graduação, e pela companhia em tantos campos.

Agradeço a Victor Ruas pela contribuição crucial para o andamento do trabalho.

Agradeço aos membros da banca examinadora, por terem aceitado o convite, e pela valiosa contribuição neste trabalho, doando tempo e conhecimento.

E enfim, agradeço a radical transformação da concepção de tempo, espaço e natureza concedida pelo estudo da Geologia, que irei carregar durante toda a minha vida.

Sumário

Resumo	5
Agradecimentos	6
Lista de Figuras	8
Lista de Tabelas	10
Anexo	10
1 Introdução.....	11
1.1 Objetivo	11
1.2 Geologia Regional	12
1.3 Histórico de Exploração	13
1.4 Geologia do Maciço Ultramáfico de Santa Fé.....	13
2 Laterita Niquelífera.....	14
2.1 Evolução do Perfil Laterítico.....	14
2.2 Clima e Fisiografia	15
2.3 Tipos de Depósito.....	16
3 Metodologia.....	18
3.1 Definição da estratigrafia do regolito de Santa Fé	18
3.2 Base de Dados	19
3.3 Interpolação dos dados e Mapas	20
3.4 Estatística.....	22
4 Resultados e Discussão.....	23
4.1 Estruturação dos horizontes do regolito	23
4.2 Mapas Geoquímicos	26
4.3 Distribuição Geoquímica em <i>Box Plots</i>	38
4.4 <i>Scatterplots</i>	42
5 Conclusões.....	54
6 Bibliografia.....	57
Anexo: Mapas Geoquímicos	59

Lista de Figuras

Figura 1. Mapa de localização do depósito.	11
Figura 2. Mapa Geológico do Maciço Ultramáfico de Santa Fé de Goiás. Modificado de Barbour (1980).	12
Figura 3. Definição da estratigrafia do regolito.....	19
Figura 4. Mapa de furos de sonda e limites da área de estudo com porções destacadas. 19	
Figura 5. Modelo gráfico do <i>IDW</i> (modificado de Childs, 2004).	21
Figura 6. Semivariograma para o CaO no R123.	22
Figura 7. Mapa de Isópacas para o R123.....	23
Figura 8. Mapa Topográfico; Compartimentos: N -Norte, C – Central, E – Leste, SW – Sudoeste.....	24
Figura 9. Mapa com relevo sombreado, fonte: GoogleMaps.	24
Figura 10. Mapa de Isópacas para o R56.....	25
Figura 11. Mapa de Isópacas para o R78.....	25
Figura 12. Mapa de Isópacas para o R8.....	26
Figura 13. Mapa de Isovalor Ni no R123	27
Figura 14. Mapa de Isovalor Ni no R56.	27
Figura 15. Mapa de Isovalor Ni no R78.	28
Figura 16. Mapa de Isovalor Ni no R8.	29
Figura 17. Mapa de Isovalor Ni no U.	30
Figura 18. Mapa de Isovalor Mg no R78.....	30
Figura 19. Mapa de Isovalor Mg no R8.....	31
Figura 20. Mapa de Isovalor Fe no R56.	31
Figura 21. Distribuição dos depósitos de Ni laterítico. Modificado de Brand <i>et al</i> (1998).	32
Figura 22. Mapa de Isovalor Al no R8.	33
Figura 23. Mapa de Isovalor SiO ₂ no R8.....	34
Figura 24. Mapa de Isópacas do Perfil Laterítico.....	34
Figura 25. Mapa de Isovalor Co no R123.	35
Figura 26. Mapa de Isovalos Co no R56.	36
Figura 27. Mapa de Isovalor Co no R78.	37
Figura 28. Mapa de Isovalor Mn no R123.....	37
Figura 29. Mapa de Isovalor Mn no R8.....	38
Figura 30. <i>Box Plot</i> SiO ₂	39
Figura 31. <i>Box Plot</i> Mg.	39
Figura 32. <i>Box Plot</i> LOI.	39

Figura 33. <i>Box Plot</i> Fe.....	39
Figura 34. <i>Box Plot</i> Mn.....	40
Figura 35. <i>Box Plot</i> Al.....	40
Figura 36. <i>Box Plot</i> Co.....	40
Figura 37. <i>Box Plot</i> Ni.....	40
Figura 38. <i>Box Plot</i> Al nos protólitos.....	41
Figura 39. <i>Box Plot</i> SiO ₂ nos protólitos.....	41
Figura 40. <i>Box Plot</i> Fe nos protólitos.....	41
Figura 41. <i>Box Plot</i> Ti nos protólitos.....	41
Figura 42. <i>Box Plot</i> LOI nos protólitos.....	42
Figura 43. <i>Box Plot</i> Ni nos protólitos.....	42
Figura 44. <i>Box Plot</i> Mg nos protólitos.....	42
Figura 45. <i>Box Plot</i> Co nos protólitos.....	42
Figura 46. <i>Scatterplot</i> Al ₂ O ₃ x TiO ₂ no U, com teores de Ni.....	43
Figura 47. <i>Scatterplot</i> Al ₂ O ₃ x TiO ₂ no U, com respectivo protólito discriminado.....	43
Figura 48. <i>Scatterplot</i> Al ₂ O ₃ x TiO ₂ no R8, com respectivo protólito discriminado.....	43
Figura 49. <i>Scatterplot</i> Al ₂ O ₃ x TiO ₂ no R7, com respectivo protólito discriminado.....	44
Figura 50. <i>Scatterplot</i> Fe ₂ O ₃ x Co no R123.....	44
Figura 51. <i>Scatterplot</i> MnO x Co no R123.....	44
Figura 52. <i>Scatterplot</i> MnO x Co no R5.....	45
Figura 53. <i>Scatterplot</i> Fe ₂ O ₃ x Co no R5.....	45
Figura 54. <i>Scatterplot</i> MnO x Co no R6.....	45
Figura 55. <i>Scatterplot</i> Fe ₂ O ₃ x Co no R6.....	45
Figura 56. <i>Scatterplot</i> MgO x Ni no R7.....	45
Figura 57. <i>Scatterplot</i> MgO x Ni no R8.....	45
Figura 58. <i>Scatterplot</i> MgO x Ni no U.....	46
Figura 59. <i>Scatterplot</i> MgO x Ni no R5.....	46
Figura 60. <i>Scatterplot</i> MgO x Ni no R6.....	46
Figura 61. <i>Scatterplot</i> LOI x Ni no R7.....	46
Figura 62. <i>Scatterplot</i> LOI x Ni no R8.....	47
Figura 63. <i>Scatterplot</i> LOI x Ni no U.....	47
Figura 64. <i>Scatterplot</i> LOI x Ni no R5.....	47
Figura 65. <i>Scatterplot</i> LOI x Ni no R6.....	47
Figura 66. <i>Scatterplot</i> LOI x MgO no U, não corrigido para LOI.....	48
Figura 67. <i>Scatterplot</i> LOI x MgO no R7, LOI corrigido para Fe ₂ O ₃	48
Figura 68. <i>Scatterplot</i> LOI x MgO no R8, LOI corrigido para Fe ₂ O ₃	48

Figura 69. <i>Scatterplot</i> LOI x MgO no R5, LOI corrigido para Fe ₂ O ₃	48
Figura 70. <i>Scatterplot</i> LOI x MgO no R6, LOI corrigido para Fe ₂ O ₃	49
Figura 71. Diagrama ternário do U.....	49
Figura 72. Diagrama ternário do R8.....	49
Figura 73. Diagrama ternário do R7.....	49
Figura 74. Diagrama ternário do R5.....	50
Figura 75. Diagrama ternário do R6.....	50
Figura 76. <i>Scatterplot</i> LOI x Al ₂ O ₃ no R7.....	51
Figura 77. <i>Scatterplot</i> LOI x Al ₂ O ₃ no R8.....	51
Figura 78. <i>Scatterplot</i> LOI x Al ₂ O ₃ no U.....	51
Figura 79. <i>Scatterplot</i> Fe ₂ O ₃ x Ni no R7.....	51
Figura 80. <i>Scatterplot</i> Fe ₂ O ₃ x Ni no R5.....	51
Figura 81. <i>Scatterplot</i> Fe ₂ O ₃ x Ni no R6.....	51
Figura 82. <i>Scatterplot</i> Fe ₂ O ₃ x Ni no R7.....	52
Figura 83. Aproximação do percentual da massa dos elementos para cada horizonte, “T x E” foi calculado pela mediana do teor multiplicado pela espessura média, para regiões com horizonte ausente foi adotado 0 m.....	52
Figura 84. <i>Box Plots</i> para espessuras dos horizontes. Nota: Desconsideram os furos de sondagem que não possuem o horizonte.....	53

Lista de Tabelas

Tabela 1. Dados estatísticos.....	20
Tabela 2. Exemplo de cálculo utilizado.....	21

Anexo

1. Mapa de Isovalor Mn no R78.....	59
2. Mapa de Isovalor Fe no R78.....	59
3. Mapa de Isovalor Fe no R8.....	60
4. Mapa de Isovalor Al no R56.....	60
5. Mapa de Isovalor Al no R78.....	61
6. Mapa de Isovalor Al no R8.....	61
7. Mapa de Isovalor SiO ₂ no R56.....	62
8. Mapa de Isovalor SiO ₂ no R78.....	62

1 Introdução

1.1 Objetivo

O presente trabalho visa conduzir um estudo sobre a distribuição geoquímica no regolito do depósito de Ni laterítico de Santa Fé desenvolvido sobre o Maciço Ultramáfico Alcalino de Santa Fé, localizado no município de Santa Fé, região SW do Estado de Goiás (Figura 1), cerca de 266 km de cidade de Goiânia. A importância econômica do trabalho recai sobre seu potencial para as *Commodities* Ni e Co que se encontram enriquecidos no perfil laterítico. Dessa forma, as análises e conclusões serão favoráveis a compreender o comportamento desses metais.

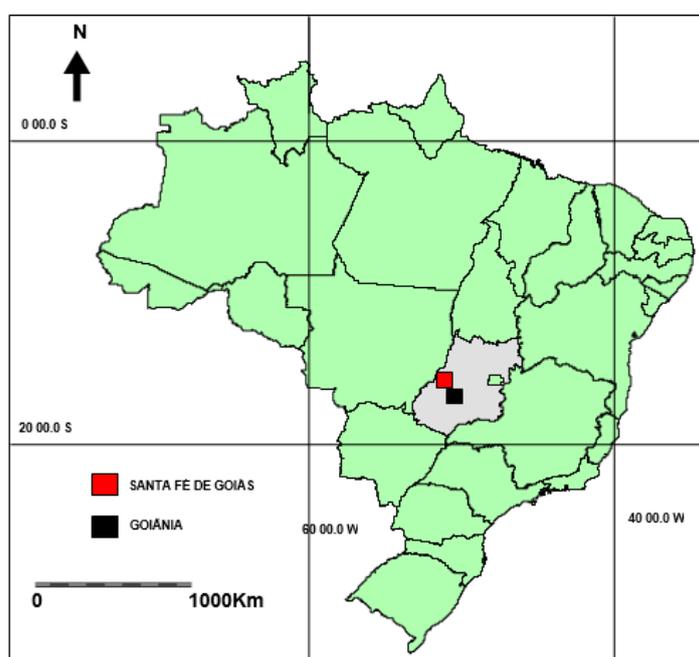


Figura 1. Mapa de localização do depósito.

Baseado no modelo de evolução de perfis lateríticos sobre rochas ultramáficas, o objetivo é compreender as relações espaciais dos elementos dentro do perfil, e relacioná-los entre si e à mineralogia descrita na bibliografia, além de corroborar e acrescentar aos trabalhos produzidos anteriormente na área com uma análise de um banco de dados geoquímico mais abrangente disponibilizado por empresas que realizaram trabalhos de pesquisa mineral na área recentemente.

Foram utilizadas ferramentas de tecnologia GIS (*Global Information System*) e *softwares* de análise estatística, conferindo um carácter quantitativo para as características geoquímicas e contribuindo assim para o aumento de conhecimento da região.

1.2 Geologia Regional

O corpo do maciço ultramáfico de Santa Fé está inserido dentro da Província Alcalina do Sul de Goiás, que engloba diversas intrusões ultramáficas alcalinas. Estão distribuídas em um terreno composto por rochas do Neoproterozóico, sequências metavulcanossedimentares de Bom Jardim de Goiás, Arenópolis, Iporá e Amorinópolis, além de granitos pós tectônicos e metassedimentos do Grupo Cuiabá, referentes ao embasamento. Segundo Oliveira (1980), sobrepostos às rochas do Neoproterozóico estão os arenitos devonianos da Fm. Furnas, Fm. Ponta-Grossa e Fm. Aquidauana da bacia do Paraná, com conglomerados basais no contato com o embasamento.

A província alcalina datada do Mesozóico é constituída por dunitos, peridotitos e piroxenitos alcalinos serpentinizados (Figura 2), e morfologicamente são alçados do terreno por platôs, onde desenvolveram-se perfis lateríticos durante o cenozóico.

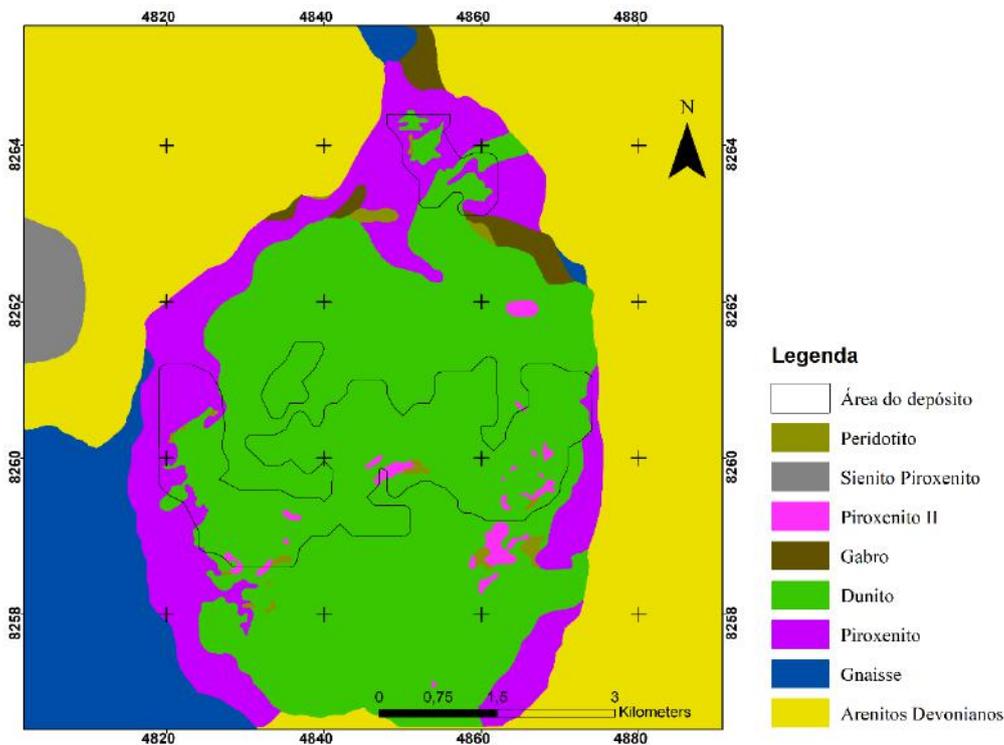


Figura 2. Mapa Geológico do Maciço Ultramáfico de Santa Fé de Goiás. Modificado de Barbour (1976).

1.3 Histórico de Exploração

A região estudada é uma área que apresentou, na segunda metade do séc. XX, grande interesse por parte de órgãos de pesquisa e empresas privadas, por apresentar potencial metalogenético para algumas *commodities*, dentre estas podemos citar o Ni e vermiculita. A Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) realizou trabalhos de mapeamento regional para o DNPM, com a finalidade de caracterizar esta faixa de rochas ultramáficas serpentinizadas presentes na região SW do Estado de Goiás.

No início da década de 70 a mineradora Montita Ltda. demonstrou intenso interesse na área executando numerosos trabalhos geoquímicos em superfície e em subsuperfície para o Ni através de escavações de poços de pesquisa que, no entanto, ficaram limitados pela profundidade do lençol freático. Tais iniciativas aumentaram o interesse pela pesquisa mineral na área, estimulando assim diversas pesquisas acadêmicas visando descrever a geologia e a mineralização niquelífera associada ao perfil laterítico (Barbour, 1976; Oliveira, 1980).

Entre 2005 e 2010 a mineradora TeckCominco Brasil Ltda. retomou os trabalhos de pesquisa exploratória na área, que originaram a base de dados geoquímicos em amostras de testemunhos de sondagem e de poços utilizados neste trabalho.

1.4 Geologia do Maciço Ultramáfico de Santa Fé

As rochas do maciço ultramáfico de Santa Fé estão intrudidas nos gnaisses regionais com idade de 467 Ma segundo Barbour *et al* (1979) (datação Rb-Sr), relacionados ao ciclo Brasileiro, de acordo com tais autores o Maciço Ultramáfico possui idade K-Ar de aproximadamente 80 Ma.

O corpo do maciço ultramáfico alcalino tem formato ovalado com eixo maior de 9,5 km N-S, e 6,5 km W-E. Porta-se como um domo zonado bordejado por piroxenitos e peridotitos, e no centro é majoritariamente dunítico (80% das rochas aflorantes). Apresentam nos seus contatos com a rocha encaixante metamorfismo de contato com litotipos albita-epidoto até feldspato-cordierita-hornfels.

O maciço sofreu alterações mineralógicas por completo, com serpentinação generalizada e faixas de alteração hidrotermal compostas por vermiculita e opacos (Barbour, 1976).

As principais rochas que constituem o substrato do perfil laterítico são os dunitos serpentinizados, compostos por principalmente por olivinas completamente serpentinizadas, e ocorrem clinopiroxênios, opacos, carbonatos e micas de natureza

vermiculítica como minerais subordinados. A olivina serpentinizada apresenta-se com fibras paralelas aos limites dos grãos, podendo ocorrer algum cristal remanescente no seu centro. O dunito apresenta características distintas em diferentes pontos, levando a crer que a intrusão ocorreu em múltiplos pulsos (Barbour, 1976).

Os peridotitos são compostos principalmente por olivina magnesiânica e diopsídio, granulação média a grossa, também possui opacos, flogopita e carbonatos como acessórios. Segundo Oliveira (1980), os opacos são mais abundantes que no dunito, e a serpentinização menos influente, devido ao fenômeno incidir principalmente sobre as olivinas.

Já os clinopiroxenitos possuem granulação média a grossa, com composição de até 85% de diopsídio, os acessórios são opacos, flogopita e titanita. Do ponto de vista químico é classificada como rocha básica, os peridotitos e dunitos são classificados como ultrabásicas. Mas os três litotipos são caracterizados como rochas ultramáficas devido a predominância de minerais máficos.

2 Laterita Niquelífera

2.1 Evolução do Perfil Laterítico

Um perfil de Laterita Niquelífera, em geral, apresenta três ou quatro componentes, onde as terminologias variam muito dentro da literatura. Primeiramente temos o protólito (rocha ígnea ultramáfica), sendo o Ni componente da estrutura de silicatos como as olivinas ricas em Mg (fosterita) que podem apresentar conteúdo de Ni de 0,2 a 0,4% em massa, ou o mais comum, nos seus produtos de alteração serpentinizado, já é possível encontrar material argiloso esverdeado (“garnierita”) enriquecido em Ni e veios de quartzo nas fraturas e juntas. . Como processo da alteração intempérica forma-se no primeiro estágio o saprólito, caracterizado por preservar a maior parte das estruturas físicas do protólito sendo dessa forma um processo isovolumétrico, apesar dos minerais primários estarem quase totalmente alterados, dependendo de sua susceptibilidade ao intemperismo. Vale ressaltar que os piroxênios apresentam maior resistência ao intemperismo, se comparado a olivina (serie de Goldich, 1938).

O limite entre todos os horizontes do perfil é irregular e de difícil definição pela sua gradacionalidade, assim como acontece no perfil de Santa Fé, é comum a preservação de blocos do protólito imersos dentro do saprólito, pois a alteração acontece

preferencialmente nas fraturas e juntas. A granulometria do perfil é granodescrescente devido a obliteração dos minerais pelo intemperismo.

Posteriormente forma-se a zona oxidada, conhecida informalmente como zona da limonita, marcada pela perda da estrutura original da rocha e total alteração dos silicatos. Há uma lixiviação intensa do Mg e de parte da SiO₂ deixando como resultado uma dominância de óxidos de Fe e Mn nesse horizonte. Mais acima, essa zona adquire aspecto mais avermelhado (laterita vermelha ou marrom) e o volume de material não é mais conservado. Há consenso sobre a evolução da goetita para a hematita da base para o topo da zona oxidada. O volume desse horizonte colapsado pode chegar a 15% da rocha original (Golightly, 1981).

Na parte superior pode formar-se uma densa e rígida camada ferruginosa (também conhecidas como resíduo laterítico, canga ou ferricrete) que pode se desenvolver e proteger as camadas inferiores da erosão.

O termo “laterita” é usado tanto para designar todo o regolito, assim como horizontes em específico, havendo também diferenças descritivas entre eles (Gleeson *et al*, 2003). De maneira geral é descrita a parte superior rica em óxido de Fe e pobre em SiO₂, encontrada em solos extremamente intemperizados de regiões de clima tropical. Não obstante ao fato de tal horizonte normalmente não apresentar concentrações economicamente explotáveis de Ni, o termo Ni laterítico é utilizado, pois os níveis ricos em Ni estão inseridos no contexto geral de evolução destes perfis.

O tempo de formação de perfis lateríticos não é consenso, mas Nahon (1991) e Nahon e Tardy (1992) sugeriram, por cálculos de balanço de massa, uma taxa de intemperização de 5-50 mm/k.a., e média de 20 mm/k.a., assim a evolução de um regolito se daria de 1 a 6 M.a. Os mesmos autores salientaram que rochas básicas e ultrabásicas intemperizam-se de 2 a 3 vezes mais rápido que outros tipos de rochas. Golightly (1981) completa sugerindo que de 20 a 100 m de peridotito são necessários para produzir minério de Ni em saprólito em 1 M.a, apesar de esses fatores serem muito variáveis entre cada depósito.

2.2 Clima e Fisiografia

Estes complexos ultramáficos precisam estar submetidos a condições específicas a fim de produzir e preservar um perfil como descrito anteriormente, sendo alguns dos fatores controladores discutidos nesse tópico.

A tectônica regional pode contribuir com a construção de um terreno soerguido que facilita a infiltração, aumento de fluxo d'água e rebaixamento do nível freático. As regiões mais enriquecidas em Ni concentram-se em cristas, terraços e platôs. Tal configuração junto a falhas e fraturas resulta numa máxima lixiviação e drenagem das soluções. Estes processos são muito importantes por concentrar o Ni na base do regolito, no saprólito, como descrito em depósitos da Nova Caledônia por Golightly (1981).

Em uma topografia mais arrasada, com o lençol freático atingindo os níveis mais superiores do perfil e reduzindo a drenagem dos fluidos, reduz-se o potencial de acumulação do Ni nas porções inferiores do saprólito. Em peridotitos tal situação favorece a produção de um depósito de esmectita com baixo teor de Ni no saprólito. Já em dunitos há a facilitação para formar depósitos oxidados.

O clima tem um importante papel no desenvolvimento destes perfis. Muitos formados em climas tropicais (*e.g.* Colômbia, Indonésia e Amazônia) e savanas (*e.g.* Cuba e Brasil Central). Há uma combinação de intensa pluviosidade, temperaturas elevadas e atividade biogênica, que favorecem o desenvolvimento destes depósitos em áreas onde o relevo também permite a infiltração das soluções intempéricas. Os depósitos que não se encontram em climas desse tipo podem ter sido formados preteritamente sob condições morfoclimáticas mais favoráveis que as atuais. Muitos depósitos dos balcãs e Ásia central, por exemplo, foram soterrados por sedimentos mais recentes, sendo assim preservados.

O protólito também exerce forte influência na formação desses depósitos. Sabe-se que as características do protólito, por possuir uma composição quase monomineralica de olivina, piroxênio e/ou serpentina está muito mais suscetível a intemperização, pois são minerais altamente instáveis nas condições superficiais.

2.3 Tipos de Depósito

Os depósitos de Ni laterítico são comumente classificados em três tipos, baseado na mineralogia de minério: Tipo silicato hidratado, tipo argilo-silicático e tipo oxidado.

Nos depósitos de silicato hidratado, o minério encontra-se no saprólito e o minerais de minério são os silicatos hidratados de Mg e Ni. Localmente desenvolvem-se regiões de intensa venulação e *box-works* e atingem médias de teor de Ni de 1,8 a 2,5%. Acompanham fraturas, bordas de minerais e estruturas do protólito e podem apresentar a formação de veios de quartzo (e/ou amorfos da SiO₂) e o grupo de argilominerais ricos em Ni genericamente chamado garnierita (silicato hidratado de Mg e Ni). Nesse depósito

o Ni é lixiviado das fases oxi-hidróxido e realocado no saprólito como silicatos hidratados e argilominerais ou substituindo o Mg da serpentina. Esse tipo de depósito é um dos mais importantes, pois apresenta a maior parte da produção mundial de Ni laterítico.

Em ambientes de pH mais neutro, onde a SiO₂ é apenas parcialmente solubilizada pela água, forma-se o tipo de depósito onde a mesma associa-se ao Fe, Ni e Al para formar argilas ricas em Ni (nontronita) na parte mediana a superior do perfil, formando depósitos argilo-silicáticos. As serpentinas níquelíferas também podem ser substituídas por esmectita/vermiculita. Tal depósito apresenta teores médios ligeiramente menores, da ordem de 1,2% de Ni segundo Brand *et al* (1998).

Nos depósitos oxidados, também chamados de depósitos limonitizados, o Ni está alojado nos oxi-hidróxidos de Fe, comumente a goetita (FeO(OH)). Além disso os óxidos de Mn associados podem apresentar enriquecimento em Co, formando um depósito misto com Ni e Co. Segundo Trivedi e Axe (2001), há uma ampla discussão sobre o modo de ocorrência do Ni associado aos oxi-hidróxidos de Fe, podendo este estar adsorvido na superfície dos oxi-hidróxidos, ou estar integrado na estrutura cristalina do mineral substituindo o Fe, acredita-se que ambas as ocorrências aconteçam simultaneamente. A exploração exclusivamente deste depósito é mais rara por apresentar concentrações de Ni menores que o depósito tipo argilo-silicático, mas é comum ocorrer como um minério secundário de teor mais baixo associado a depósitos do tipo silicato hidratado.

Apesar de constituírem depósitos com gênese e mineralogia diferentes, os depósitos tipo silicato hidratado e argilo-silicático apresentam controles geoquímicos similares, devido a proximidade do raio iônico dos cátions Mg²⁺ e Ni²⁺, além do número de oxidação iguais. Tal fator permite que haja a substituição do Mg pelo Ni na estrutura cristalina do silicatos magnesianos. A maioria dos minerais de minério estão de acordo com essa estruturação como: serpentina (Mg₃[Si₂O₅](OH)₄), talco ((Mg₆(Si₈O₂₀)(OH)₄), esmectita/vermiculita (argilominerais de Na, Ca e Mg) e clorita ((Mg,Al,Fe)₁₂(Si, Al)₈O₂₀(OH)₁₆), formados em metamorfismo de baixa temperatura e posterior intemperismo.

O tipo de depósito só é parcialmente controlado pela litologia. Cada um dos três depósitos podem desenvolver-se em peridotitos, mas em dunitos, depósitos oxidados são predominantes (Gleeson *et al*, 2003).

3 Metodologia

3.1 Definição da estratigrafia do regolito de Santa Fé

Durante os trabalhos exploratórios executados mais recentemente pela empresa TeckCominco, a estratigrafia do regolito foi definida como contendo os seguintes horizontes intempéricos de cima para baixo até o protólito:

- R1 – Solo Pisolítico, coloração marrom escuro com pisólitos ricos em Mn, em uma matriz síltico arenosa, além de possuir alto magnetismo.
- R2 – Ferricrete, cimentado em estrutura pisolítica, rico em Mn, se desenvolve melhor próximo a drenagens formando camadas descontínuas.
- R3 – Transição, avermelhado muito argiloso, misturado com fragmentos de SiO₂ e pisólitos dispersos.
- R5 – Saprólito Ocre (equivalente a zona da limonita), muito ferruginoso com pouco magnetismo, pouco denso e pouca textura do protólito.
- R6 – Saprólito Ferruginoso, apresenta micas disseminadas ou em vênulas, possui cor marrom avermelhado, se diferencia do R5 pela melhor preservação das texturas do protólito e presença de zonas micáceas ricas em clorita, vermiculita e serpentina. Oliveira (1980) descreve ainda resquícios da estrutura do protólito, mas com perda total de coesão do solo, acrescenta ainda como sendo o domínio da goetita junto ao R5.
- R7 – Saprólito Verde, cor verde pálido a acizentado, bem texturizado e mais coeso, com melhor preservação das feições do protólito.
- R8 – *Saprock*, núcleos muito coesos de protólito incipientemente alterado entre material saprolítico mais friável, apresenta a mineralogia principal ainda preservada, exceto pela olivina.
- U – Rocha fresca, dunito serpentizado (U1), peridotito serpentizado (U2) e piroxenito serpentizado (U3), alteração intempérica já incipiente demonstrando coloração amarronzada devido a ferruginização.

Neste trabalho, para efeitos de tratamento de dados, os horizontes R1, R2 e R3 foram reunidos num só (R123), tanto para a construção dos mapas quanto para a análise estatística, representando os níveis lateríticos propriamente ditos do regolito, além dos horizontes R5, R6, R7, R8 e U que foram tratados separadamente.

Para a construção dos mapas adotou-se o R56 (R5+R6) a fim de aumentar a área de cobertura dos dois horizontes, R78 (onde os trechos descritos como R8 mas que estão inseridos no R7 como blocos, ou seja, acima do R7 de cota mais baixa serão considerados como sendo parte do R7 no mapa) (Figura 3).

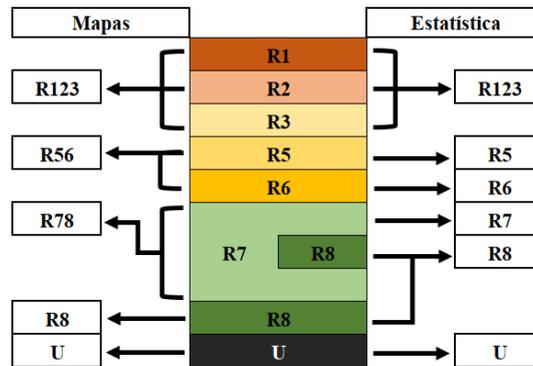


Figura 3. Definição da estratigrafia do regolito.

3.2 Base de Dados

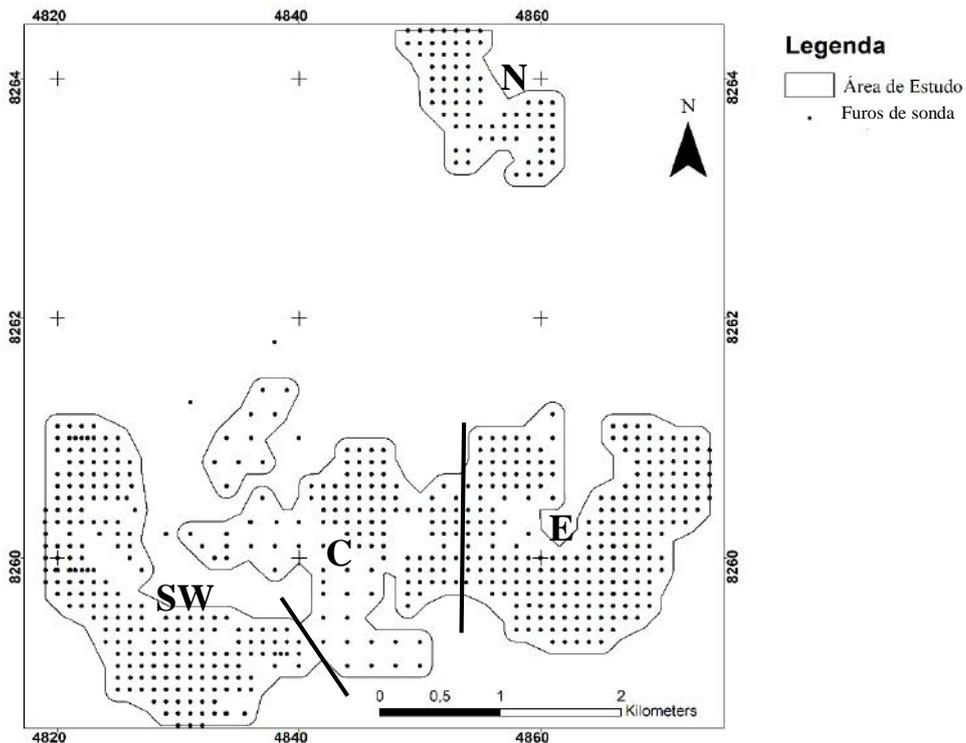


Figura 4. Mapa de furos de sonda e limites da área de estudo com porções destacadas.

Foram utilizados dados geoquímicos referentes a 691 furos de sondagem da mineradora; sendo 608 do tipo *Diamond Drillhole*, 67 do tipo Circulação Reversa e 16 poços de pesquisa. Estes furos foram feitos em malha com espaçamento que variou de 50 a 100 m segundo ilustrado na Figura 4, que também mostra o depósito dividido em 4 grandes porções a saber: porção N, SW, SE e Central. As amostras de testemunhos de sondagem foram analisadas em intervalos contínuos, porém irregulares, obedecendo aos horizontes do regolito identificados, no entanto com média de 1 m de intervalo. Com isso, um total de 10543 amostras foram analisadas por fluorescência de raio-x, nos laboratórios SGSGeosol, para os elementos: alumínio (Al_2O_3), cálcio (CaO), cobalto (Co), cromo (Cr_2O_3), ferro (Fe_2O_3), magnésio (MgO), manganês (MnO), níquel (Ni), fósforo (P_2O_5), silício (SiO_2) e titânio (TiO_2), e para LOI (perda ao fogo). Na Tabela 1 encontram-se os principais parâmetros estatísticos obtidos para estes elementos em toda a área do depósito.

Tabela 1. Dados estatísticos

	N válidos	% válidos	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desv. Pad.
MnO%	10543	100,0%	0,471	0,270	0,010	5,300	0,415
Fe ₂ O ₃ %	10543	100,0%	29,580	17,400	2,100	78,300	22,709
Co%	10256	97,3%	0,058	0,037	0,001	0,640	0,053
Ni%	10520	99,8%	0,559	0,370	0,010	4,081	0,526
SiO ₂ %	10543	100,0%	35,789	40,000	3,200	91,600	15,650
Al ₂ O ₃ %	10101	95,8%	2,631	1,700	0,010	26,400	2,680
MgO%	10542	100,0%	16,817	15,400	0,140	49,800	13,556
TiO ₂ %	10543	100,0%	1,564	0,930	0,020	14,200	1,817
P ₂ O ₅ %	10503	99,6%	0,102	0,050	0,010	18,970	0,421
CaO%	9939	94,3%	2,136	0,150	0,010	25,400	4,557
Cr ₂ O ₃ %	10518	99,8%	1,933	0,780	0,000	18,800	2,247
LOI_%	10543	100,0%	8,492	8,580	0,100	36,360	3,887

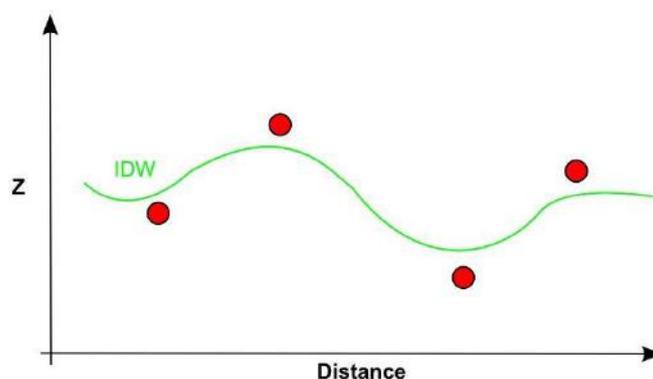
3.3 Interpolação dos dados e Mapas

Os dados utilizados para a construção dos mapas de cada elemento de um mesmo horizonte foram as médias ponderadas pelas espessuras das amostras dentro de um mesmo horizonte, a fim de conferir um único valor representando cada horizonte para o furo de sondagem em planta, como demonstrado no exemplo da Tabela 2.

Tabela 2. Exemplo de cálculo utilizado

Furo	Espessura	Horizonte	Fe2O3%	Acumulado	Ponderado
SFDD-002	0,9	R1	60,04	54,04	59,27
	0,9		58,5	52,65	
	1	R7	25,6	25,6	31,45
	1		17,54	17,54	
	0,6		23,11	13,87	
	1		31,49	31,49	
	1		46,18	46,18	
	0,6		26,4	15,84	
	1		44,47	44,47	
	1	R8	9,75	9,75	9,74

Para a confecção dos mapas geoquímicos de cada elemento e isopacas das espessuras de cada horizonte foi utilizado o método de interpolação *IDW* (*Inverse Distance Weighting*) do *Software ArcGis 10.3 for Desktop*. Esse método é usado quando a malha de pontos é densa o suficiente para cobrir toda a extensão local da variação de superfície a ser analisada (Riva, 2011). O *IDW* determina valores de célula usando uma combinação linear de pesos para cada ponto da malha (Childs, 2004), onde os pontos obedecem uma área de influência circular. Seus resultados apresentam uma superfície suavizada calculada a partir da média ponderada em relação ao inverso da distância, havendo portanto um leve achatamento da superfície. Devido ao achatamento, os valores pontuais dos furos de sondagem podem ser ligeiramente alterados como demonstrado na Figura 5. Tal alteração dos valores reais foi tolerada devido a extrema heterogeneidade do dado geoquímico no espaço, e a subjetividade da interpretação para delimitar o contato gradual dos horizontes estudados.

Figura 5. Modelo gráfico do *IDW* (modificado de Childs, 2004).

A técnica de interpolação *Spline*, do mesmo software, foi utilizada para produzir o mapa topográfico. Tal técnica se baseia em cálculos matemáticos que produzem uma superfície suavizada como o *IDW*, mas nesse caso os valores dos dados pontuais medidos *in situ* são respeitados, e a superfície passa pela altitude correta, tendo em vista que as altitudes medidas são absolutas e não estão sujeitas a interpretação nem a variações bruscas.

As áreas de influência para interpolação foram obtidas para cada elemento em cada horizonte e foram calculadas através da construção e interpretação dos respectivos semivariogramas. Os semivariogramas apresentam a variância de pares de dados no eixo y e a distância entre estes pares no eixo x. A variância tende a aumentar conforme a distância entre os pares aumenta, o ponto de alcance é marcado onde a relação entre os dados é perdida, e os pontos se espalham desordenadamente (Figura 6). A curva de ajuste foi calculada a partir do modelo circular.

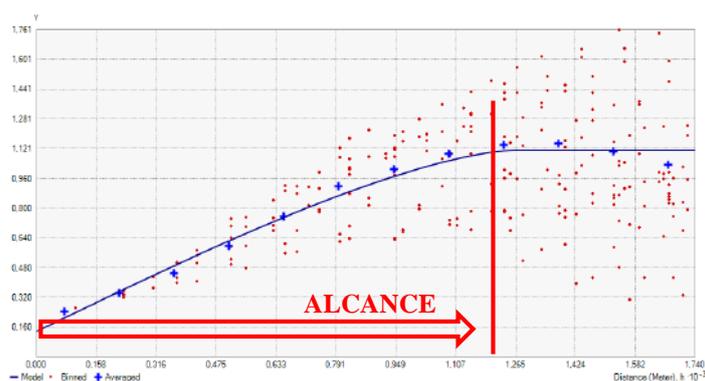


Figura 6. Semivariograma para o CaO no R123.

3.4 Estatística

Foi utilizado o *Software Dell Statistica 13.2*, *Excel 2016* e *XLSTAT 2017* para a geração de *box Plots*, *scatterplots*, gráficos ternários e Tabela de estatística básica.

Para os *Box Plots* foi utilizada a média ponderada por furo de sondagem, totalizando para números válidos o número de furos que cada horizonte está contido.

Os dados originais foram utilizados para produzir os *Scatterplots* (gráficos binários) e ternários, onde cada ponto representa um par e um trio de análises geoquímicas, respectivamente. Os gráficos LOI x Mg foram tratados matematicamente, reduzindo o LOI contido nos óxidos de Fe, neste caso foi considerado que todo o Fe está contido nos óxidos, sendo a hidratação da goetita de 10%, foi subtraído o volume de LOI correspondente aos óxidos de Fe em cada horizonte.

4 Resultados e Discussão

4.1 Estruturação dos horizontes do regolito

Com a confecção dos mapas de isópacas e isovalor, pudemos analisar a distribuição espacial dos elementos e correlacioná-los com o comportamento geoquímico dos mesmos, compreendendo sua distribuição na evolução do perfil junto da fisiografia e geologia.

O desenvolvimento dos horizontes do perfil laterítico possui relação direta com a morfologia, como foi descrito anteriormente. Essas causas são observadas nos mapas de isópacas para os horizontes. Quanto maior a proximidade com a superfície, maior a influência da topografia e erosão no desenvolvimento do perfil.

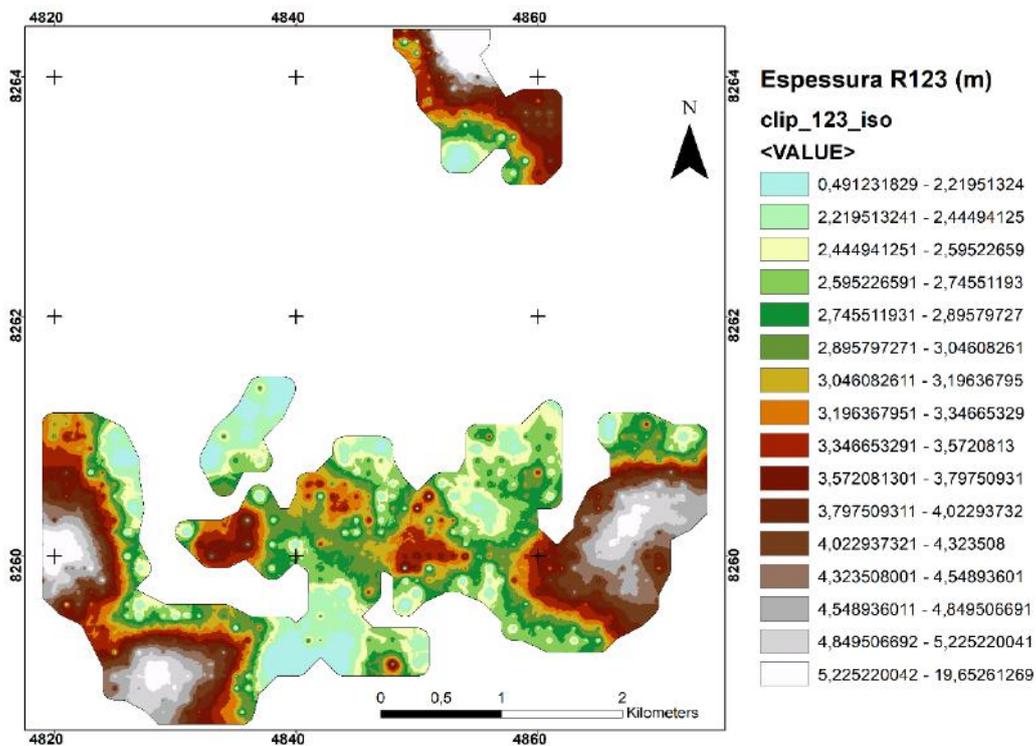


Figura 7. Mapa de Isópacas para o R123.

Se analisarmos cada região comparativamente às suas adjacências podemos constatar que o R123 (Figura 7) consegue se desenvolver e ser preservado nas áreas de relevo mais baixo e com menor gradiente topográfico, e áreas adjacentes a relevos muito altos (Figuras 8 e 9). As regiões mais delgadas se encontram em relevos mais elevados e mais acidentados, indicando para os fatores erosivos e taxa de lixiviação, maiores sob estas condições. O R56 (Figura 10) também reflete de maneira muito similar os padrões

observados no R123, destacados especialmente na região centro-norte da macro região Norte (N), no baixo relevo aplainado da região leste (E) e nas adjacências do morrotes destacados da região sudoeste (SW).

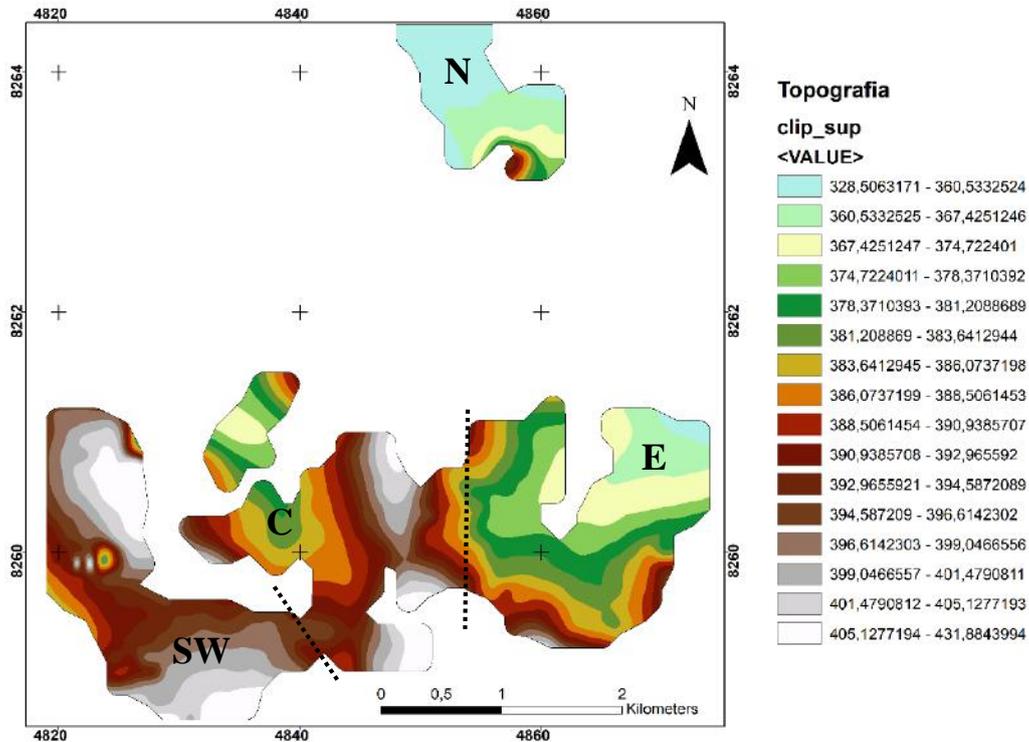


Figura 8. Mapa Topográfico; Compartimentos: N -Norte, C – Central, E – Leste, SW – Sudoeste.

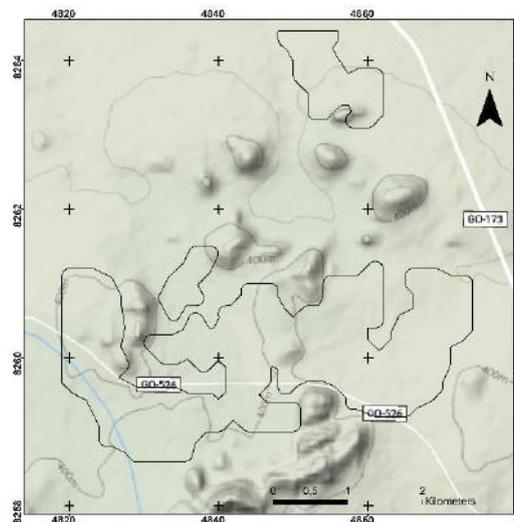


Figura 9. Mapa com relevo sombreado, fonte: GoogleMaps.

Nos horizontes inferiores, a relação da espessura do perfil com a geomorfologia não é tão evidente, o R78 (Figura 11) já apresenta maior independência do relevo,

desenvolvendo-se em regiões de alta, média e baixa elevação, já não enfrenta dificuldade em se desenvolver em regiões mais elevadas e íngremes.

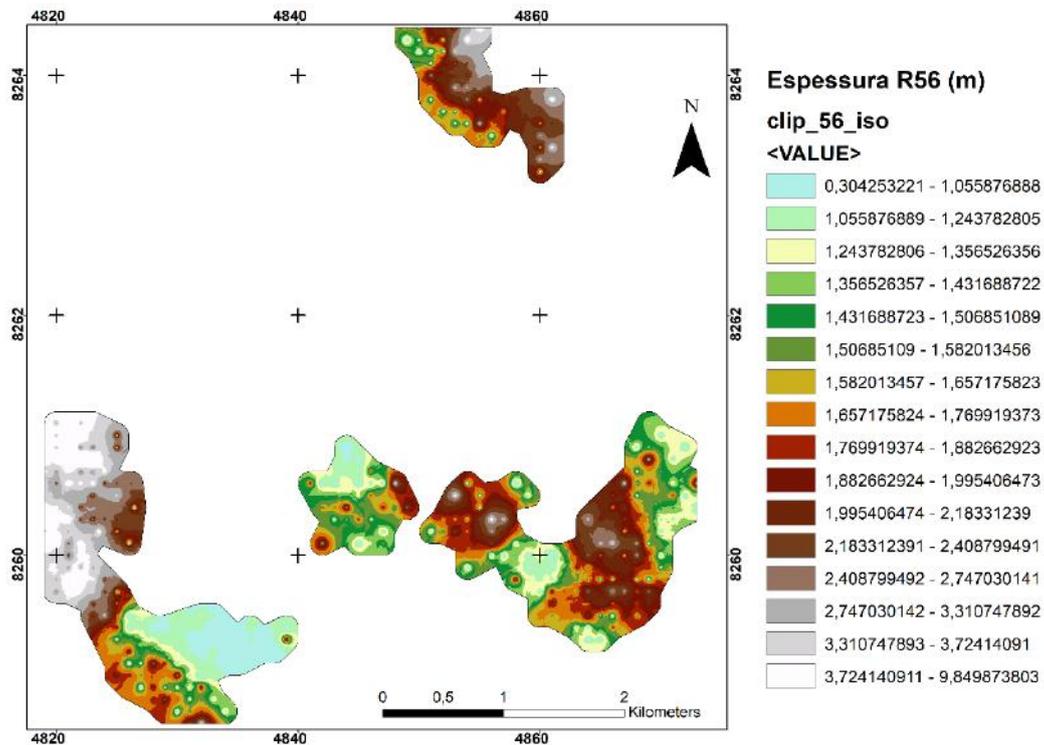


Figura 10. Mapa de Isópacas para o R56.

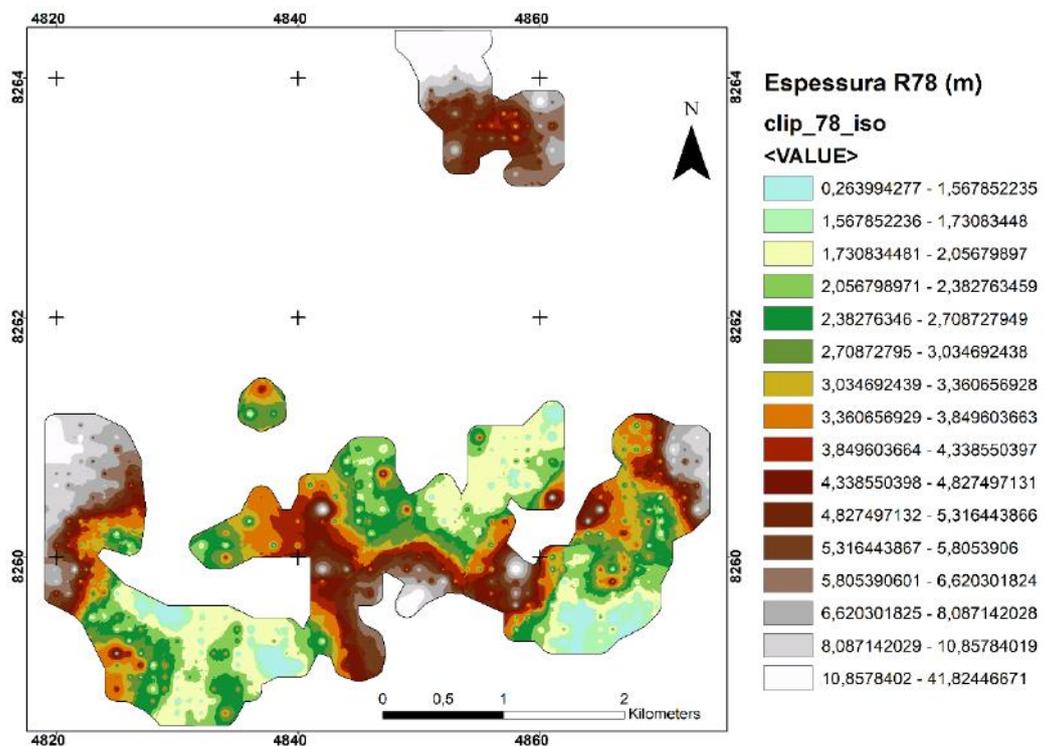


Figura 11. Mapa de Isópacas para o R78.

Em contrapartida, o R8 (Figura 12) que se aproxima mais do protólito, possui maior resistência ao intemperismo e fragmentação, parece não obedecer as condições topográficas notadas no R123 e R56, mas, muito pelo contrário, na parte centro-sul da região central (C) parece sustentar o relevo, pois é o horizonte mais expoente em espessura nessa área. E na região leste (E), região mais baixa e aplainada, possui a menor espessura, demonstrando que os processos intempéricos nessa região são mais atuantes.

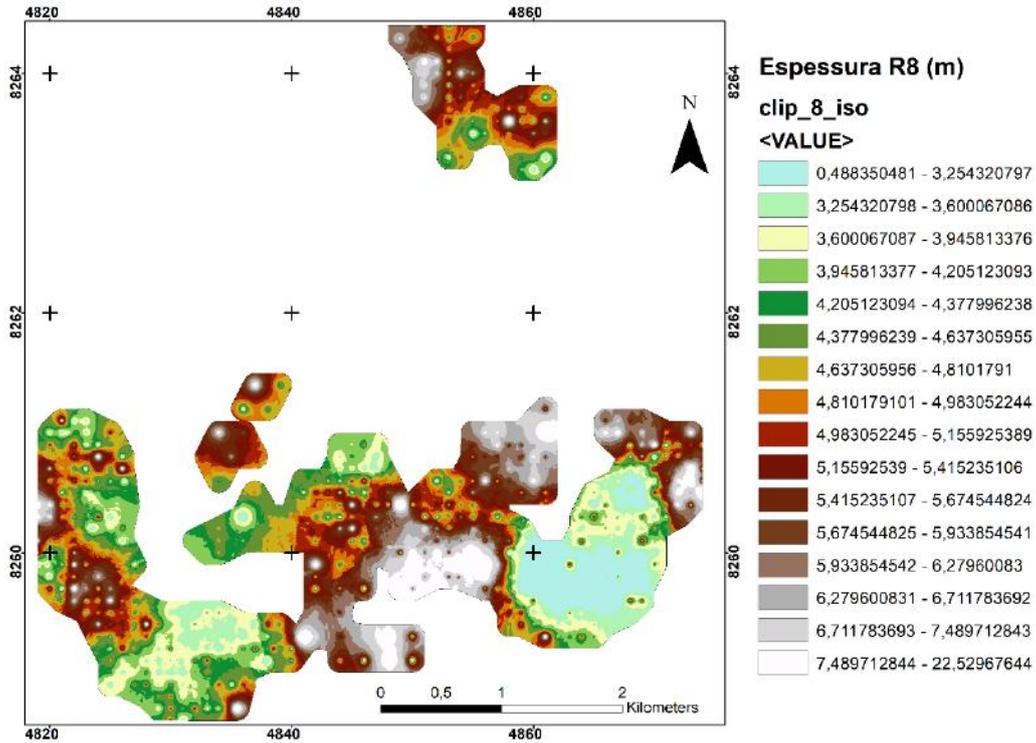


Figura 12. Mapa de Isópacas para o R8.

4.2 Mapas Geoquímicos

A distribuição do Ni mostra que as áreas mais enriquecidas em cada horizonte são aproximadamente coincidentes (Figuras 13-17). Comparado ao mapa topográfico (Figura 8), observamos que essas áreas tendem a se concentrar nas regiões de relevo mais elevado, mas que possuem um gradiente topográfico não tão acentuado. Isto pode ser observado nas regiões sudoeste (SW) e central (C) do terreno, especificamente na região central onde o gradiente é mais acentuado, onde se nota que o picos do Ni estão deslocados ligeiramente para as regiões adjacentes mais baixas, a leste e a oeste dos morrotes centrais. A topografia nesse caso funciona como um realçador das fases niquelíferas, pois são regiões com maior fluxo d'água (mais energia potencial) e consequente maior lixiviação, transporte e precipitação do Ni nos horizontes inferiores.

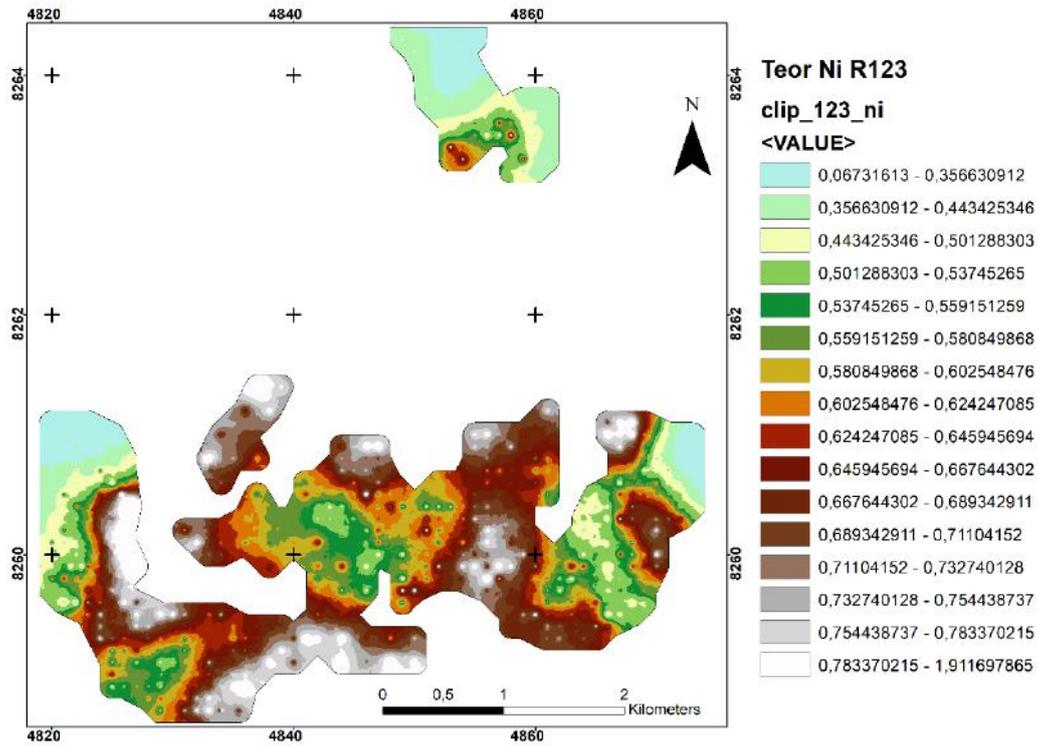


Figura 13. Mapa de Isovalor Ni no R123 .

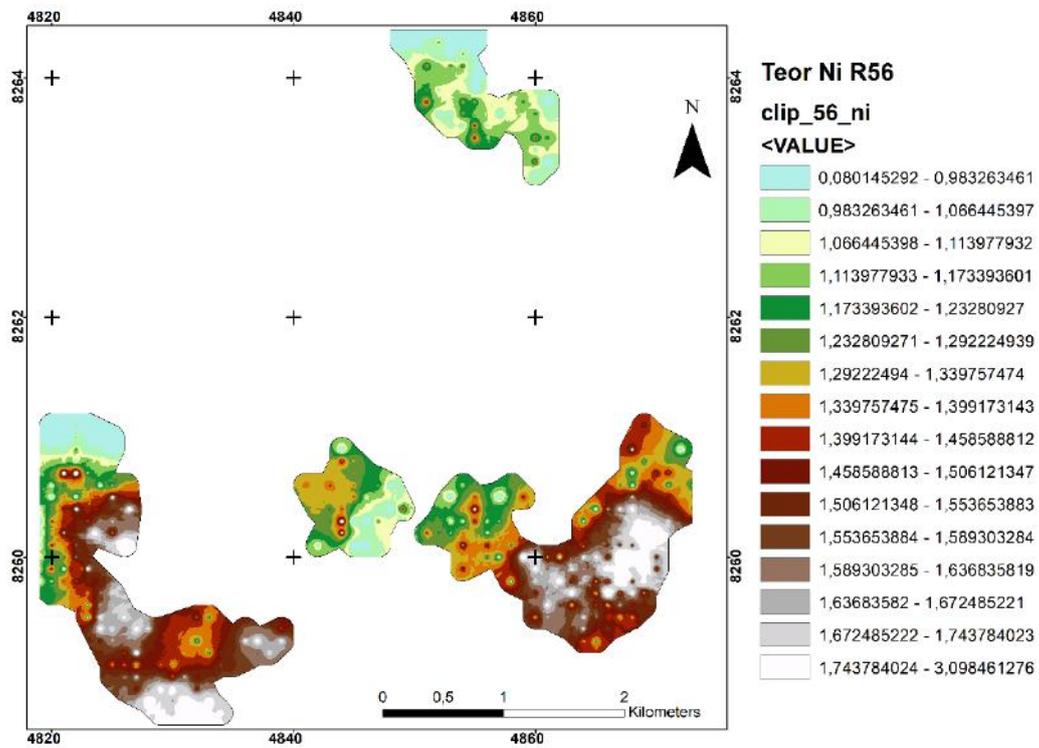


Figura 14. Mapa de Isovalor Ni no R56.

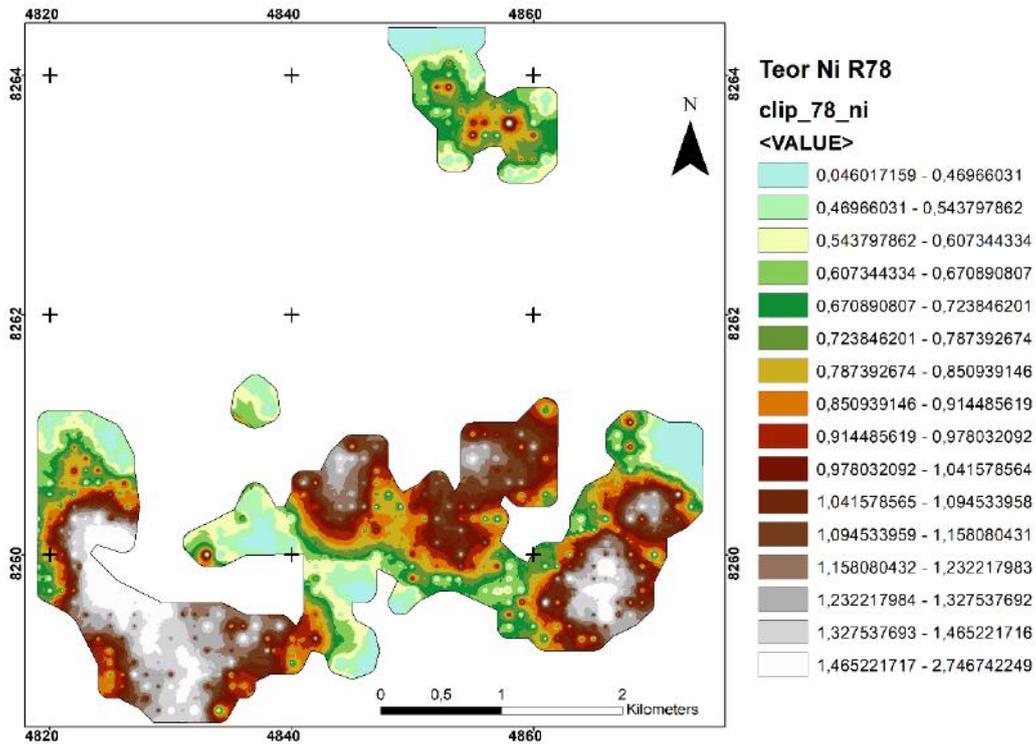


Figura 15. Mapa de Isovalor Ni no R78.

No terreno leste (E) há uma porção enriquecida que não segue o padrão observado anteriormente. Esta região encontra-se em uma área aplainada mas de topografia menos elevada, e os picos de Ni são melhor observados nos horizontes R56, R78 e R8 (Figuras 14-16), apresentando relativa sobreposição à região que possui amostragem do U mais enriquecida (Figura 19). Na região leste (E) do protólito podemos observar dois domínios com forte contraste de concentração de Ni, a região mais ao sul, com teores entre 0,19-0,57% de Ni, encontra-se mais enriquecida de 30 a 50% em relação a parte norte. Temos assim uma região onde a geoquímica do protólito tem forte influência na distribuição do Ni no regolito. Não pudemos observar a influência do U em outras regiões pela ausência de dados.

Além disso, podemos observar, especialmente no R8, uma depleção do Ni na parte NW da região SW, região N e limite mais ao E do regolito, regiões que sobrepõem o piroxenito, rochas naturalmente menos enriquecidas em Ni (Figura 2).

Apesar das concordâncias geográficas das regiões enriquecidas, é visível que as anomalias de Ni não são exatamente as mesmas nos horizontes, devido a um desenvolvimento da laterita diferente para cada horizonte em cada domínio morfológico,

e o Ni ser um elemento móvel dentro do perfil tanto verticalmente quanto lateralmente, ainda que em menor proporção.

Schellmann (1983) defende, a respeito da zona silicatada (R78, R8), que quanto maior for o nível de alteração/lixiviação maior será a depleção dos teores de Mg, fornecendo assim espaço para entrada do Ni na estrutura dos silicatos magnesianos, salientando que ele não é capaz de preencher todos os espaços vagos. Desta forma ele observou que o Ni apresentou maior enriquecimento onde havia depleção de Mg.

De acordo com o mapa do Mg para o horizonte R78 e R8 (Figura 18 e 19), mais notável no R78, constatamos as semelhanças com a descrição do autor, os níveis de Ni são depletados nas regiões onde o Mg não foi muito lixiviado (teores altos), esta proporcionalidade inversa fica visível nas regiões C (porção sul), na região SW e em menor escala na região E. A região C na parte sul pode apresentar empobrecimento em Ni também relacionado a alta taxa de erosão devido a altitude e gradiente elevados, onde a erosão poderia agir de forma mais veloz que a lixiviação do Ni, tal hipótese condiz com o delgado perfil nessa região, exceto pelo R8 (Figura 12).

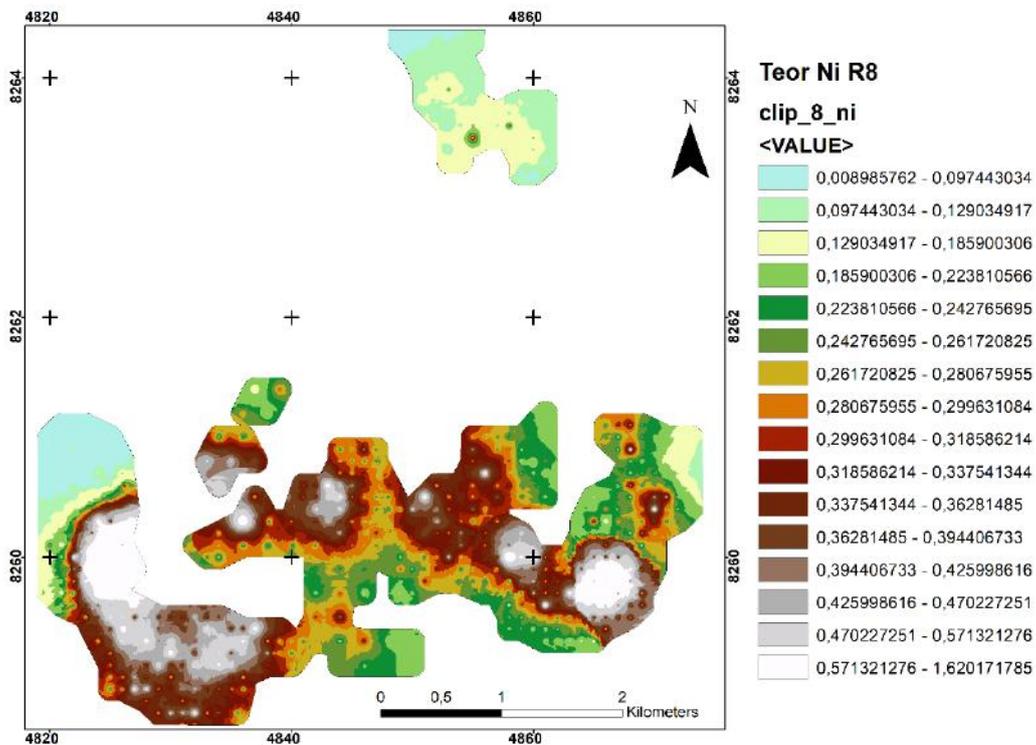


Figura 16. Mapa de Isovalor Ni no R8.

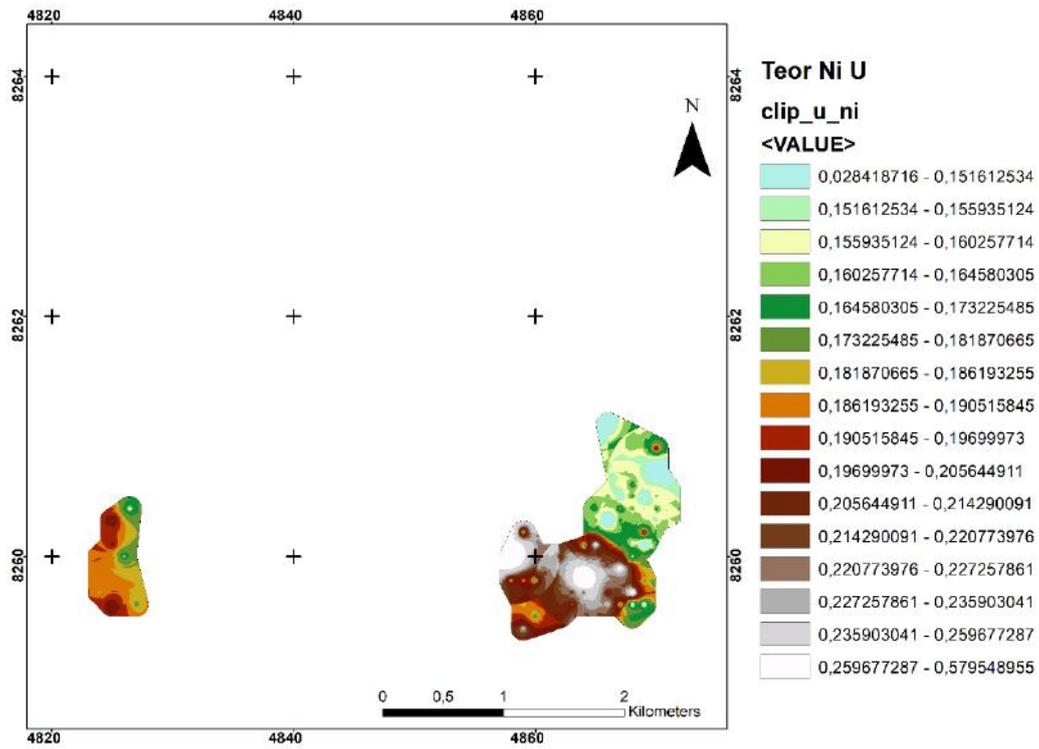


Figura 17. Mapa de Isovalor Ni no U.

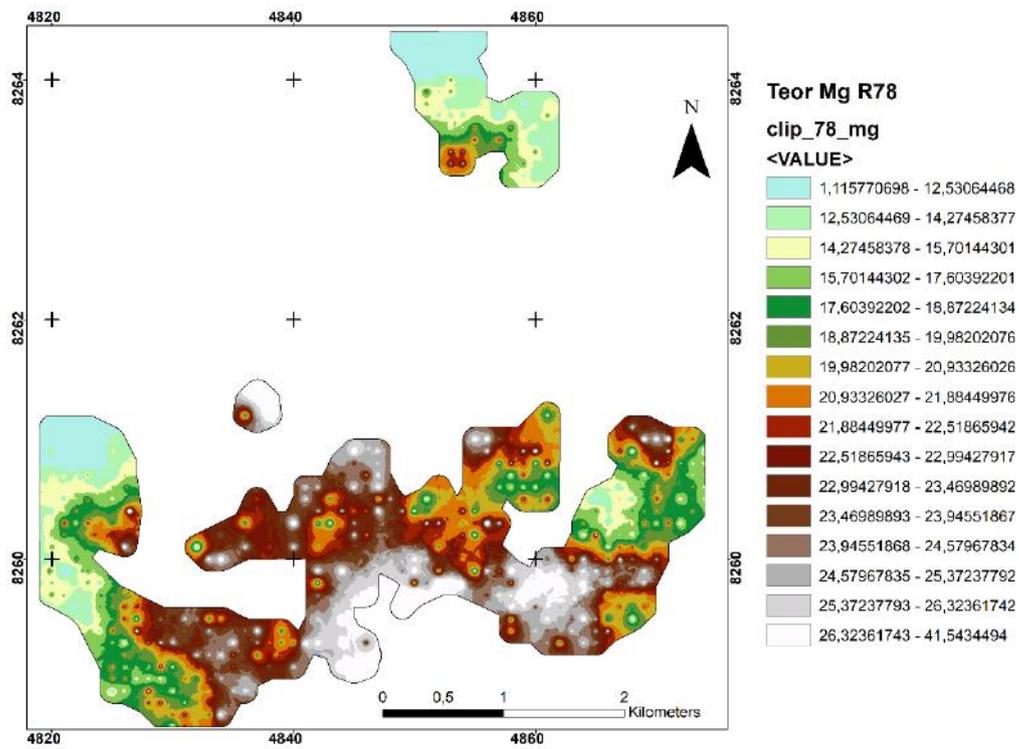


Figura 18. Mapa de Isovalor Mg no R78.

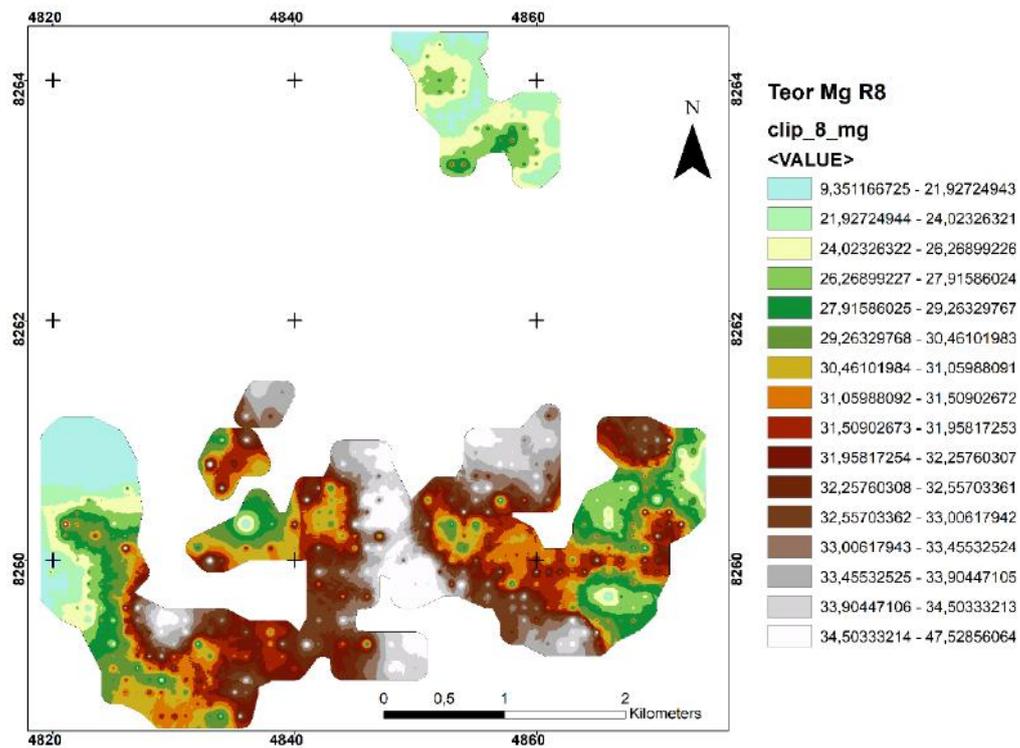


Figura 19. Mapa de Isovalor Mg no R8.

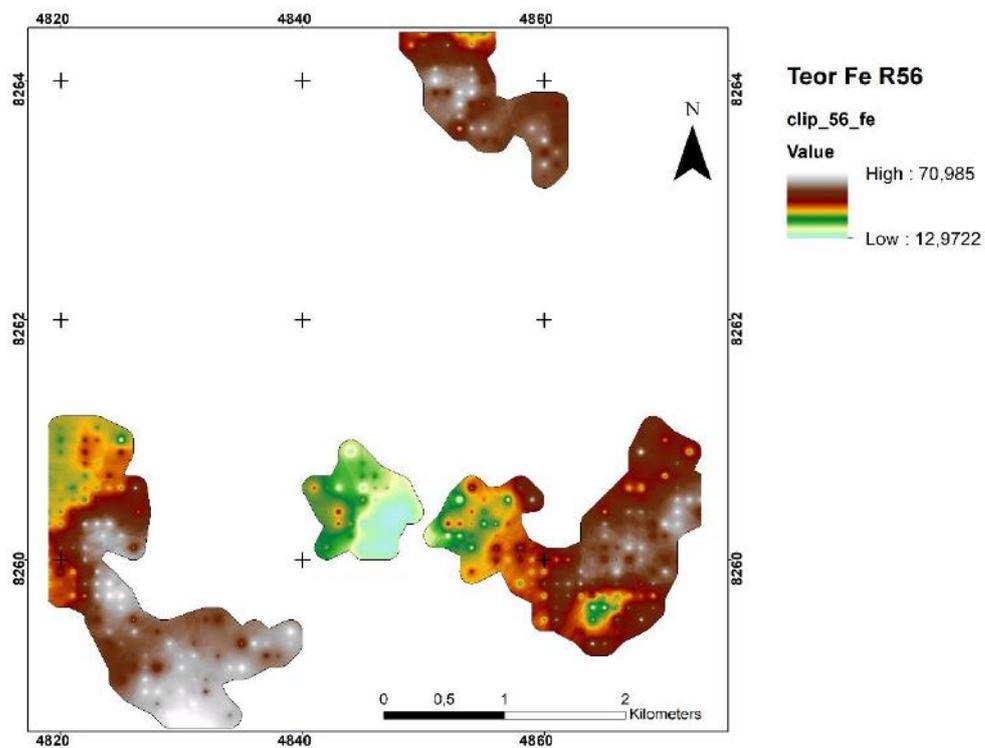


Figura 20. Mapa de Isovalor Fe no R56.

Segundo o mesmo autor, a formação do depósito niquelífero na zona do saprólito é controlada pela formação da zona da limonita no R56, pois os óxidos vão liberar o Ni em solução e carregá-lo à zona silicatada, os locais onde não houver o horizonte oxidado deve ser considerado como sendo erodido. Baseado nesta assertiva podemos observar como o Ni se comporta de maneira análoga ao Fe (Figura 20) no R56 nas regiões SW e E, pois logo que temos mais oxi-hidróxidos Fe maior a alocação para o Ni e retenção do mesmo na zona oxidada.

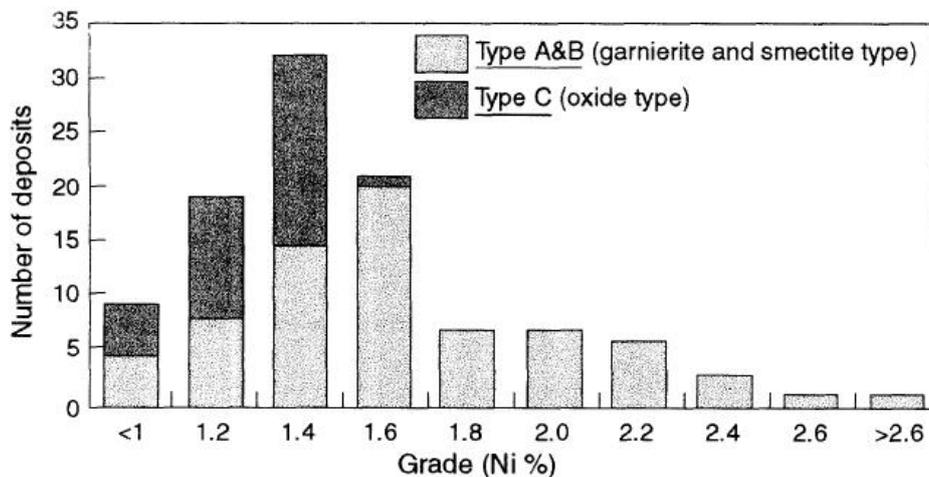


Figura 21. Distribuição dos depósitos de Ni laterítico. Modificado de Brand *et al* (1998).

Os horizontes R56 apresentam teores de 1,3 a 3,1% de Ni, e no R78 de 1,0 a 2,7% em aproximadamente metade do terreno. Os horizontes R8 e R123 atingem teores de até 1,9%, mas em regiões muito restritas, de maneira geral temos teores de até 0,6% e 0,8% de Ni no R8 e R123 respectivamente. Os autores divergem um pouco sobre os teores médios atingidos pela zona oxidada, a descrição genérica define valores médios menores na zona oxidada comparada a silicatada, mas segundo levantamentos de Brand *et al* (1998) (Figura 21) os valores encontrados para este perfil é condizente com outros depósitos .

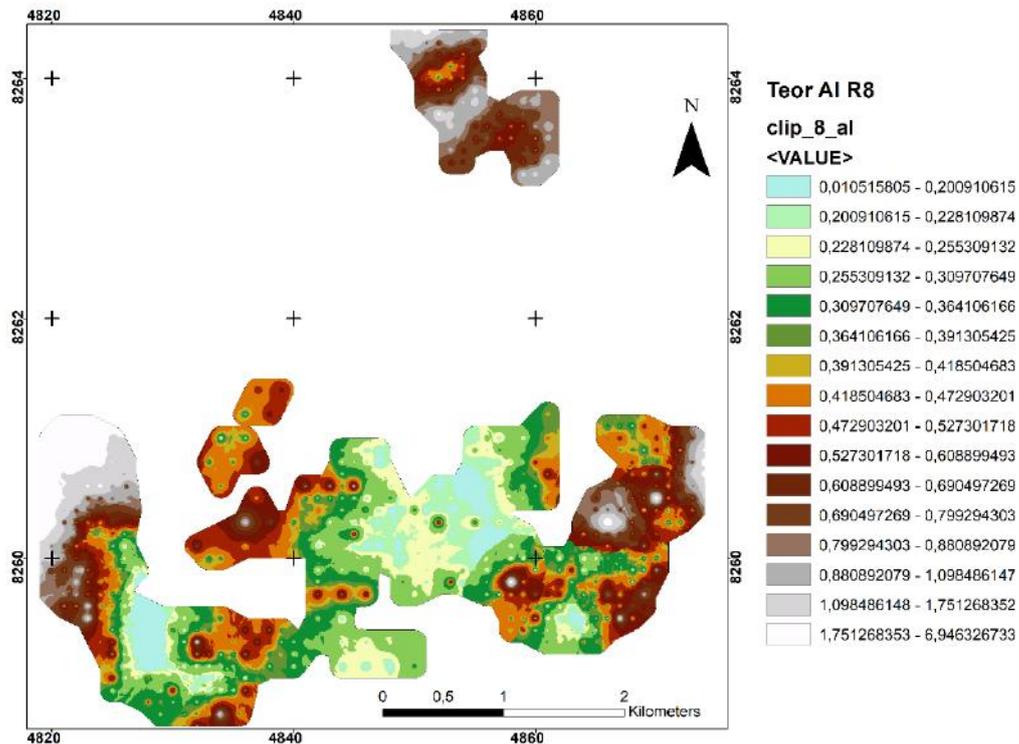


Figura 22. Mapa de Isovalor Al no R8.

A relação litológica do Ni observada entre a influência do dunito e o piroxenito também é muito visível nos teores de Al e Mg (Figuras 22 e 19) em todo o perfil (Anexo 4-6); o piroxenito em comparação ao dunito apresenta uma proporção de Al maior e Mg menor, portanto isso é refletido diretamente no regolito. Tal diferenciação fica visível também nos mapas da SiO₂ (Figura 23) em menor escala, onde a estrutura cristalina do piroxênio apresenta a estrutura da SiO₂ com dois tetraedros interligados, atingindo até 55% de SiO₂, e a olivina apenas um, teores até 41% de SiO₂, portanto a região do piroxenito apresenta maior teor de SiO₂.

A região do piroxenito também se destaca pela maior espessura do regolito (Figura 24), especialmente no R78 (Figura 11), devido a apresentar uma mineralogia mais resistente ao intemperismo e conseqüentemente também à erosão.

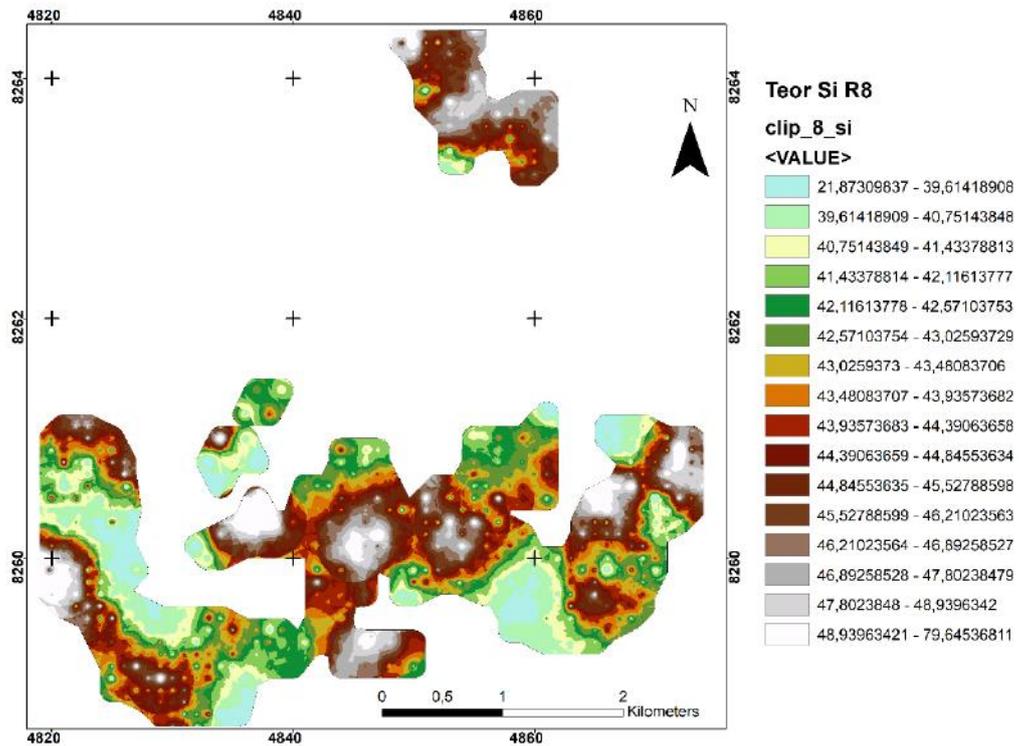


Figura 23. Mapa de Isovalor SiO₂ no R8.

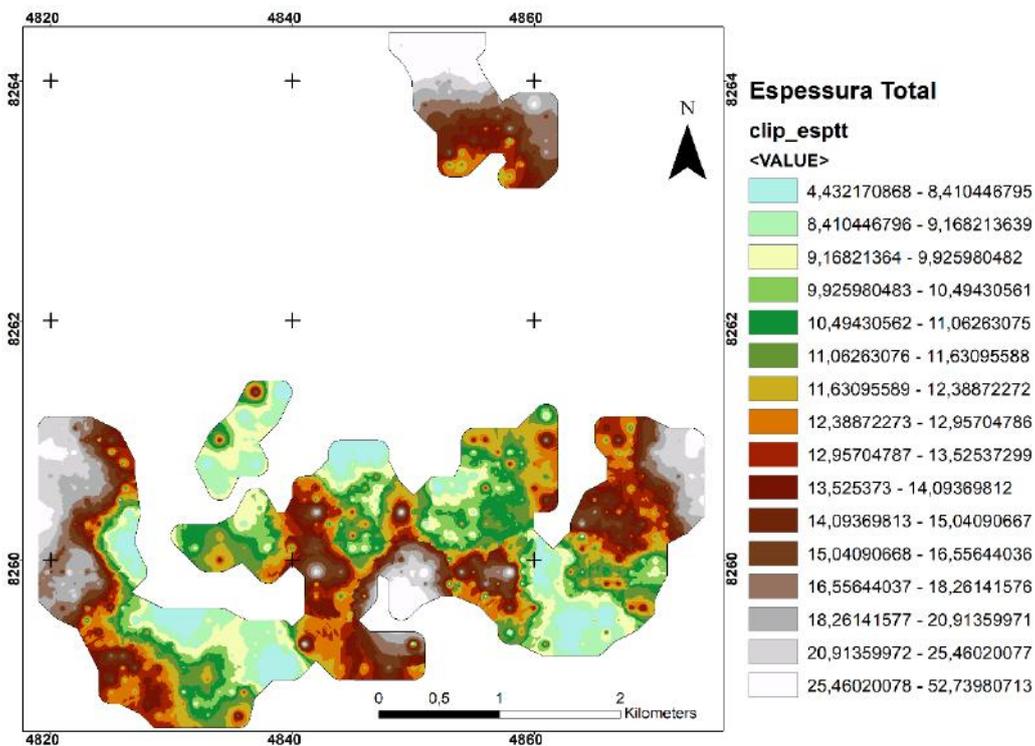


Figura 24. Mapa de Isópacas do Perfil Laterítico.

A distribuição da SiO_2 acontece de maneira antagonista ao Ni, representado no R8, reforçado nos horizontes R56 e R78 (Anexo 7 e 8), seus máximos e mínimos são invertidos, o que contraria a formação dos silicatos hidratados enriquecidos em Ni do horizonte R78. Mas devemos recordar que a SiO_2 é um componente presente na maioria dos minerais desta zona, e não necessariamente os teores mais baixos de SiO_2 nas regiões enriquecidas em Ni significa a falta de alocação para a fixação do Ni nos silicatos.

O excesso de SiO_2 nem sempre é sinônimo de formação de silicatos. Este fator está relacionado com a disposição de outros elementos; como descrito amplamente na bibliografia (Barbour, 1976; Oliveira, 1980), é muito comum a formação de vênulas de SiO_2 amorfa, e cimentação por silicificação, fenômeno que é mais comum em regiões de formação de drenagens, portanto, menos elevados, logo onde a SiO_2 atinge os maiores teores.

O comportamento da SiO_2 nesses casos pode ser explicado de maneira oposta ao que foi dito no caso do Ni, por sua mobilidade ser mais elevada, o fator lixiviação é mais contundente, tornando-o mais empobrecido em regiões com gradiente e topografia mais elevada. Este padrão não é observado na região Central, a explicação poderia estar relacionada com o protólito, que nesta região não possui amostragem direta no U, mas pelo R8 (Figura 23), mais próximo geoquimicamente ao protólito, podemos ter uma ideia de uma região mais silicatada.

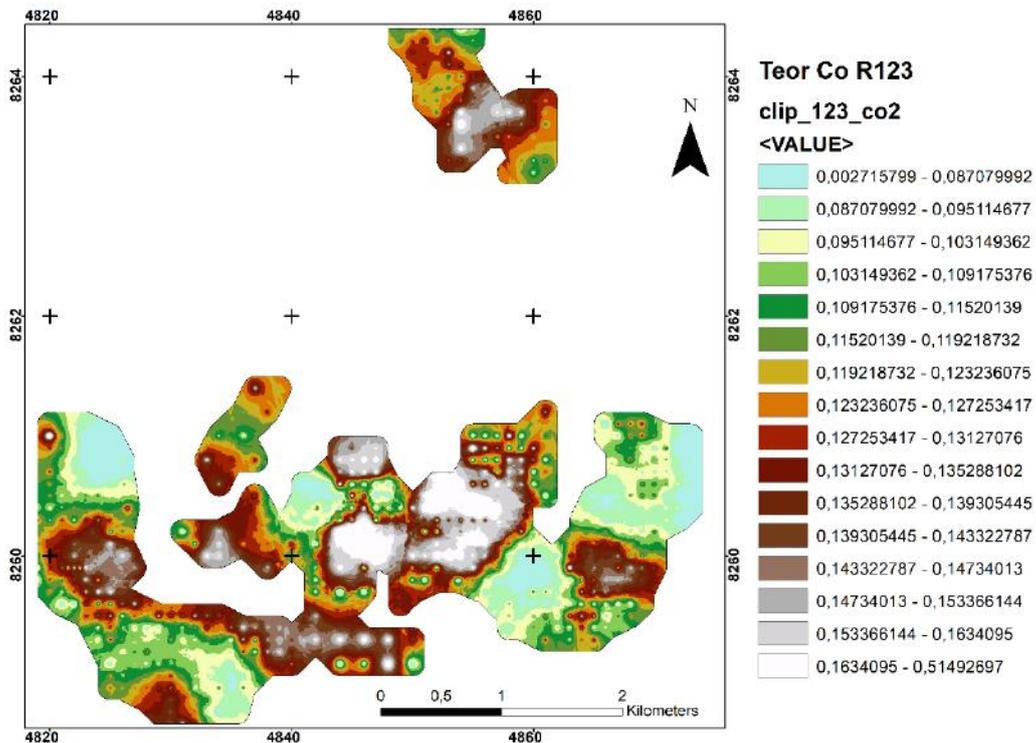


Figura 25. Mapa de Isovalor Co no R123.

Já para o caso do Co, é visível um enriquecimento acentuado no primeiro horizonte no R123 (Figura 25), mas apresenta familiaridade geográfica com as regiões mais enriquecidas desde o horizonte R56 e R78 (Figuras 26 e 27), aferindo seu carácter residual no perfil.

Destacam-se a região central (C) e norte (N) com teores da ordem de 0,15 a 0,50% de Co. Enfatizando as áreas mais enriquecidas dos horizontes R56 e R78, com 0,10 a 0,21% e 0,06 a 0,22% respectivamente. Vale destacar o empobrecimento de Co na região do piroxenito.

A relação entre Co e Mn citada amplamente na bibliografia não é sinalizada da mesma forma no mapa, seus núcleos não sobrepõem-se completamente, nem possuem proporcionalidade, isto é, não possuem o mesmo padrão de enriquecimento em cada local, por exemplo: na região norte temos um pico pequeno de Co se comparado ao Mn, e na região central temos o contrário, um maior pico de Co e menor de Mn (Figura 28). As duas informações não são antagônicas devido ao Co ser adsorvido na superfície dos oxihidróxidos de Mn, e apesar de estarem relacionados diretamente nas mesmas fases minerais, eles não ocupam os mesmos espaços na estrutura cristalina, portanto não necessariamente respeitam a proporcionalidade molar do mineral.

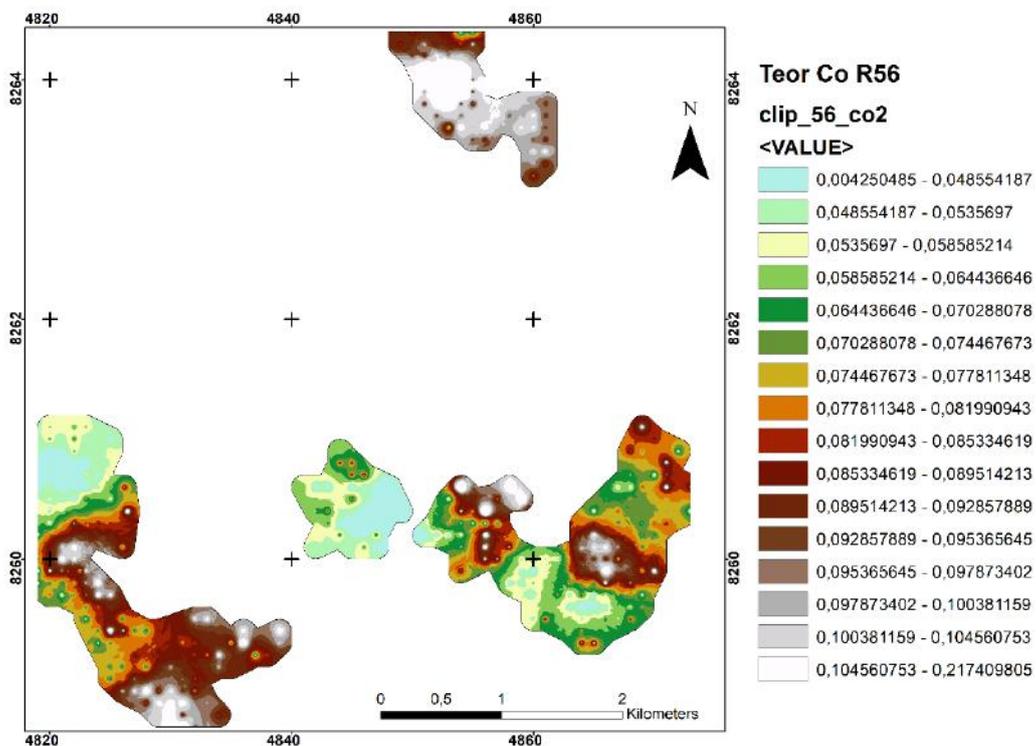


Figura 26. Mapa de Isovalos Co no R56.

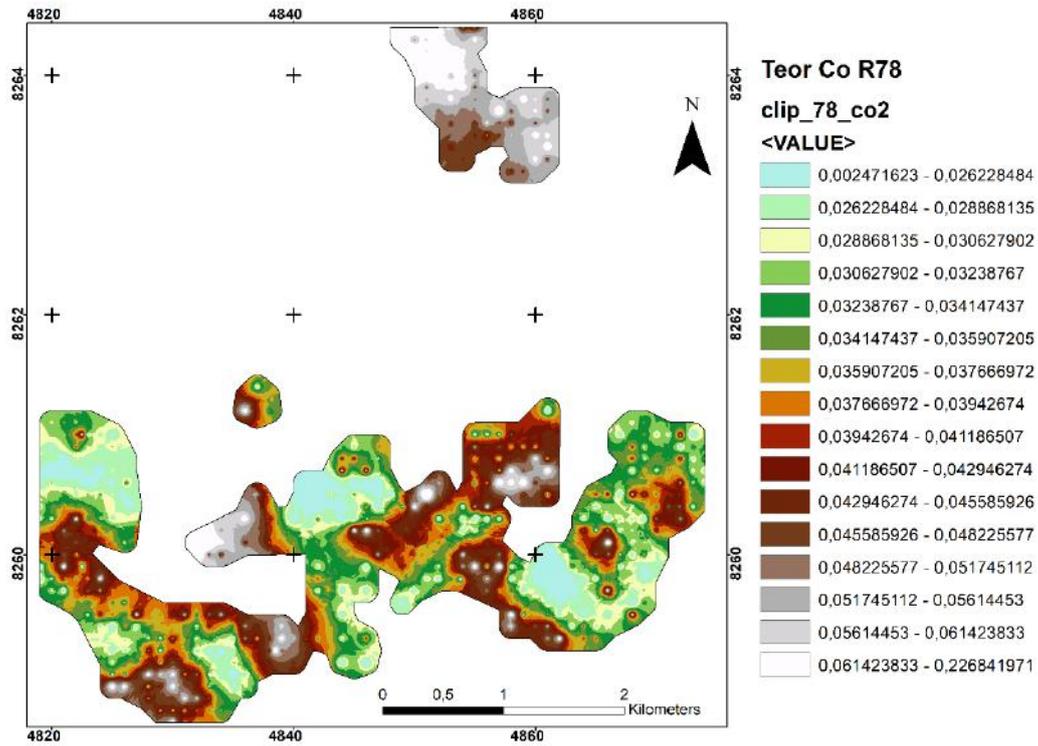


Figura 27. Mapa de Isovalor Co no R78.

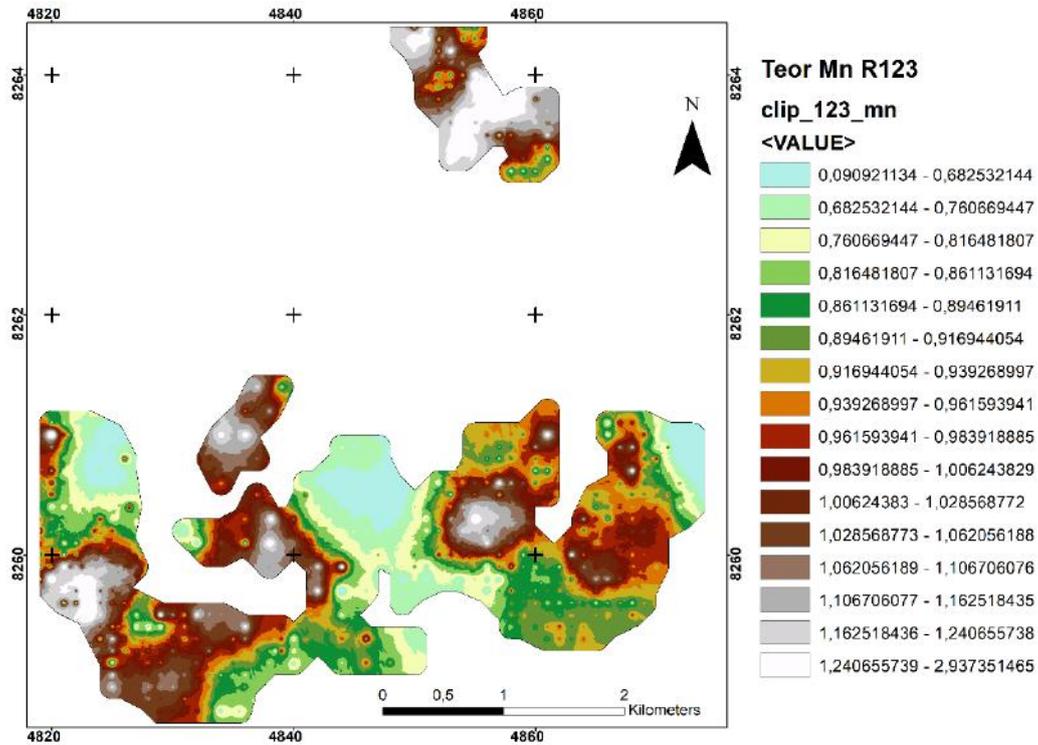


Figura 28. Mapa de Isovalor Mn no R123.

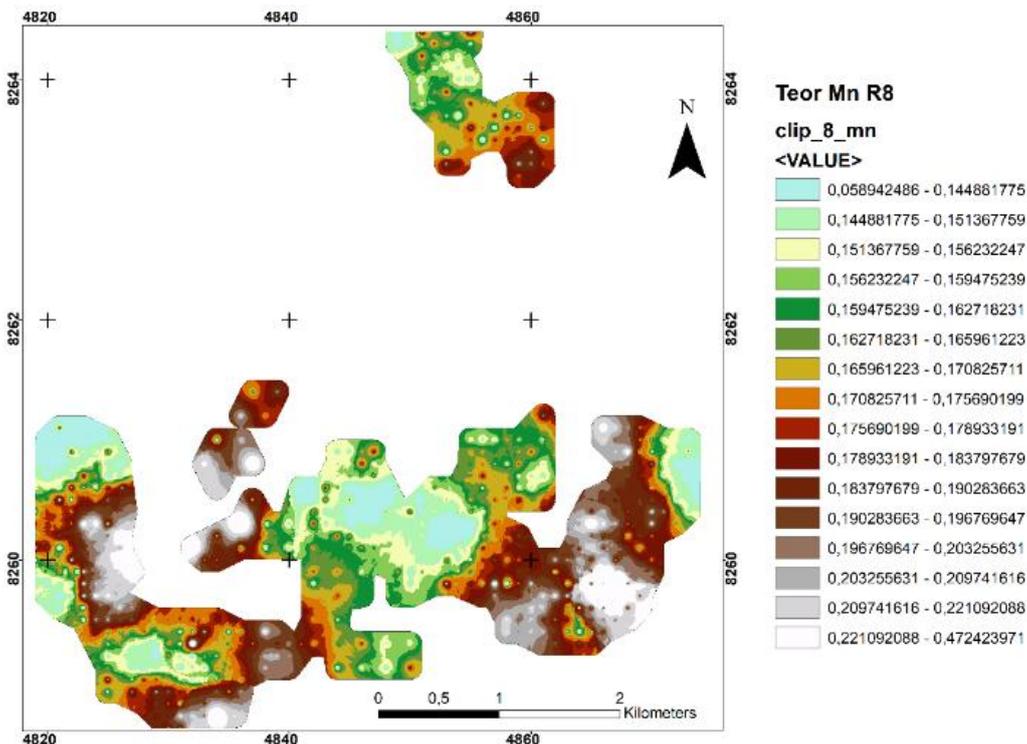


Figura 29. Mapa de Isovalor Mn no R8.

O Mn se distribui nas regiões com menor topografia e aparentemente com maior desenvolvimento do perfil, assim como o Co, no R123 com maior espessura. Evidentemente, estes dois elementos estão submetidos ao fator erosivo e a mais agressiva taxa de lixiviação, mas ao contrário do Mn, o Co consegue se preservar nos morrotes da região C, onde o Mn está depletado, e observamos o pico mais alto de Co assim como boa distribuição lateral. Evidentemente esta diferença não é relacionável com a mobilidade dos elementos, que são quase iguais nas mesmas condições de pH, mas afirmativo com a parentalidade das camadas inferiores, que carece de Mn nesta região “depletada”, como podemos observar no mapa do Mn, essa região apresenta os menores valores de Mn no R8 (Figura 29).

4.3 Distribuição Geoquímica em *Box Plots*

Os resultados gráficos dos *Box Plots*, plotados para cada horizonte, apresentam uma divisão muito nítida, já esperada para a evolução do modelo de perfil laterítico, onde classifica-se os elementos com mobilidade elevada e diminuta, baseado no grau de lixiviação. Aqueles serão lixiviados durante os processos de alteração tanto hidrotermal quanto intempérica, e estes terão comportamento residual ao longo do regolito e vão compor as principais fases minerais da zona oxidada superior.

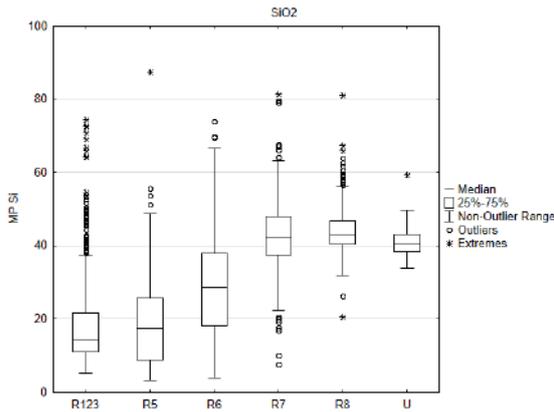


Figura 30. Box Plot SiO₂.

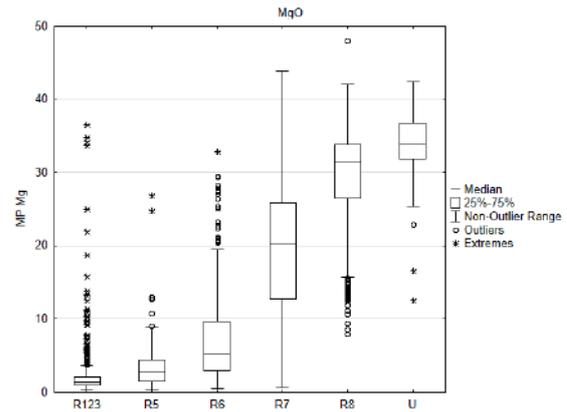


Figura 31. Box Plot Mg.

A SiO₂ e o Mg são as principais fases que apresentam empobrecimento na evolução do perfil (Figuras 30 e 31), sendo o Mg o que apresenta um empobrecimento mais acelerado a partir do horizonte R7, devido a sua boa solubilidade nas fases de pH acima de 5. Junto a estes temos a perda ao fogo (LOI) (Figura 32), relacionado aqui a água na estrutura dos minerais principalmente (hidratação).

A SiO₂ apresenta empobrecimento a partir da interface R7/R6, que é o limite da zona silicatada para a zona oxidada.

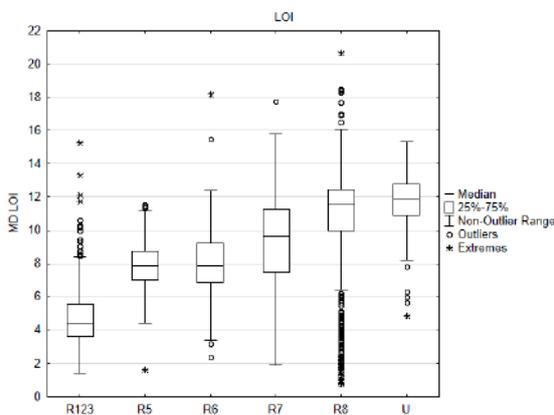


Figura 32. Box Plot LOI.

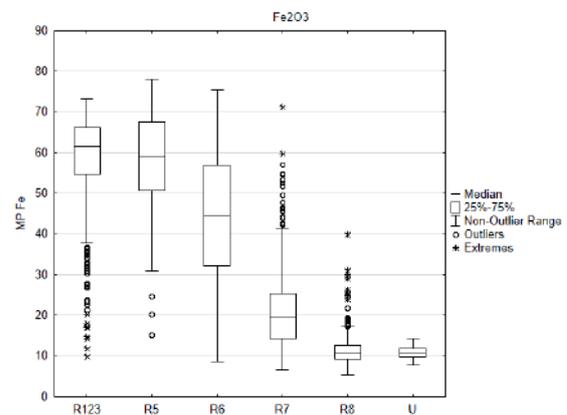


Figura 33. Box Plot Fe.

Contrapondo tais elementos, temos aqueles elementos que se concentram no perfil durante sua evolução, Fe e Mn, por exemplo, que possuem solubilidade muito baixa pós oxidação e tendem a se manter no perfil (Figura 33 e 34), e serão os componentes principais dos minerais dos horizontes superiores. Al e Co apresentam comportamento semelhantes apesar de não possuírem enriquecimento tão elevado (Figura 35 e 36). Na estratigrafia do perfil não foi descrito minerais aluminosos para a zona oxidada, mas em

baixas proporções o Al pode entrar na estrutura da goetita no lugar do Fe (Deer *et al*, 1978).

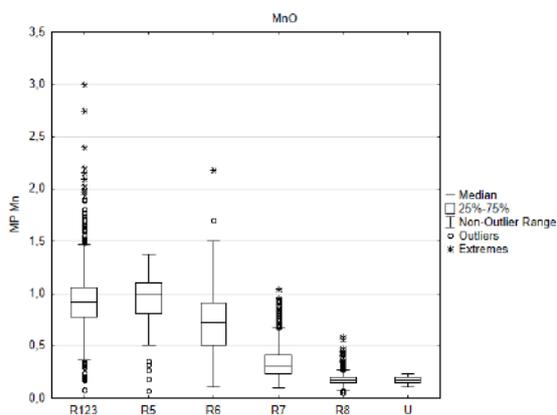


Figura 34. Box Plot Mn.

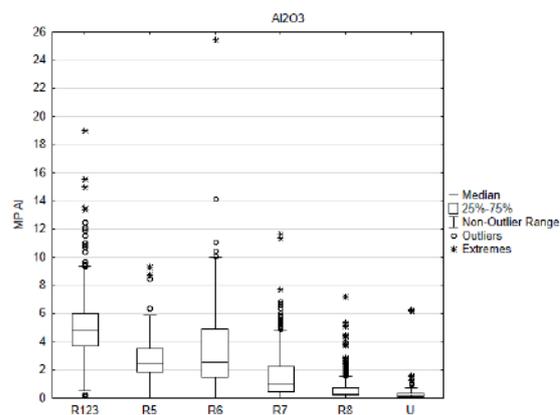


Figura 35. Box Plot Al.

O Ni (Figura 37) apresenta um comportamento intermediário, pois dentro da faixa de pH do perfil ele apresenta uma sensibilidade maior para mobilidade, Andrade e Silva (1980) e Al-Khribash (2015) afirmam que o Ni possui uma solubilidade ideal para se solubilizar em pH ácido na zona oxidada e precipitar em zonas inferiores mais básicas (perda da mobilidade do Ni em função do aumento do pH acima de 6,7); e agrega a estrutura dos minerais da zona silicatada. Observa-se os maiores teores nos horizontes oxidados basais, R5 e R6, assim como foi visto nos mapas, com teores da ordem de 1,43% e 1,35% no R5 e R6, e 0,83% de Ni no R7.

Os valores anômalos do R8 podem ser interpretados como preenchimento de porosidade secundária, haja vista que neste horizonte o intemperismo é leve, portanto, tais amostras (enriquecidas) podem representar as zonas com vênulas ricas em argilominerais e filossilicatos ricos em Ni como descrito por Barbour (1976), e não disseminado na porosidade da rocha alterada, nem nos minerais primários.

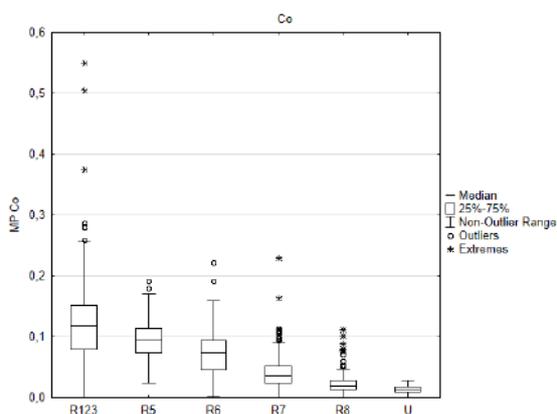


Figura 36. Box Plot Co.

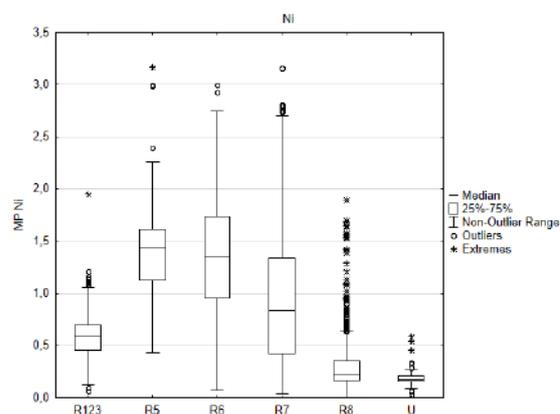


Figura 37. Box Plot Ni.

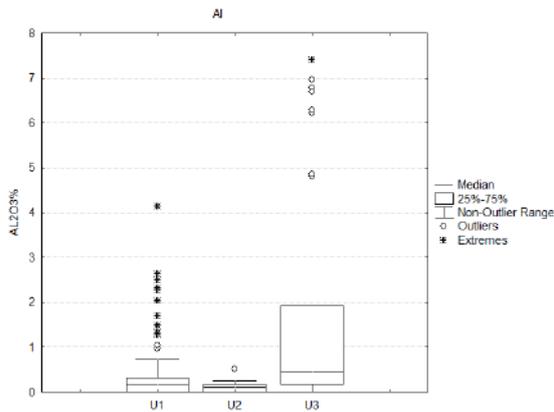


Figura 38. *Box Plot* Al nos protólitos.

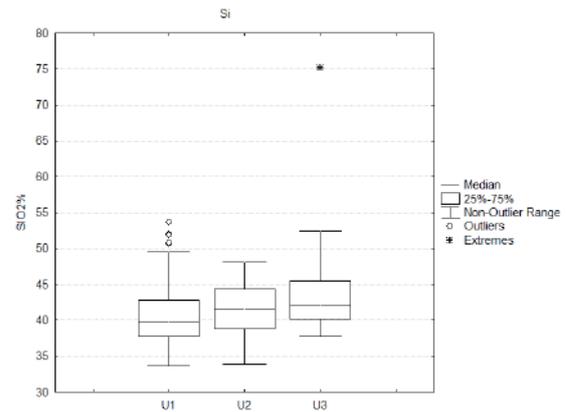


Figura 39. *Box Plot* SiO₂ nos protólitos.

Os *Box Plots* dos protólitos permitiram entender a distribuição dos elementos no perfil e confirmaram as observações feitas nos mapas. Os dados de furo de sondagem em cima do piroxenito não são todos os mesmos das regiões expostas no texto, mas nos fornecem informação sobre a composição geral das três litologias do maciço. Portanto, confirmamos nos *Box Plots* as diferenças composicionais observadas anteriormente, com o piroxenito serpentizado (U3) com teores maiores de Al, Si e Fe (Figuras 38-40), devido a abundância de diopsídio, maiores de Ti (Figura 41) relacionado a titanita mineral acessório importante na litologia (descrita por Barbour 1976), menores para LOI (Figura 42), devido a sofrer menos com o fenômeno da serpentinização (menos minerais hidratados), e menores de Ni, Mg e Co (Figura 43-45), características reconhecidas do piroxenito.

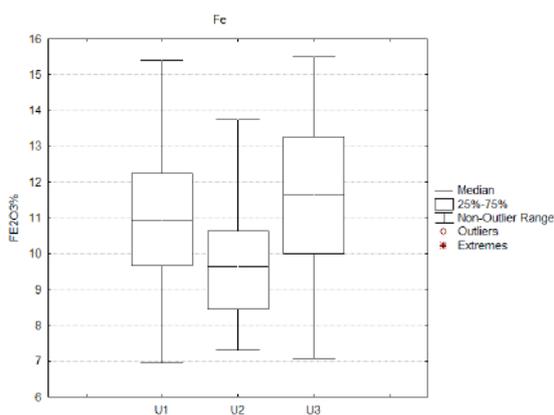


Figura 40. *Box Plot* Fe nos protólitos

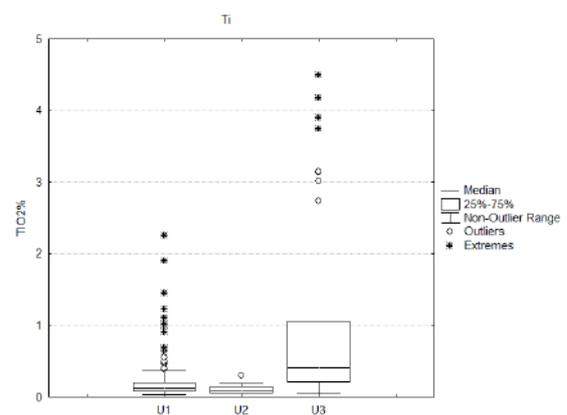


Figura 41. *Box Plot* Ti nos protólitos.

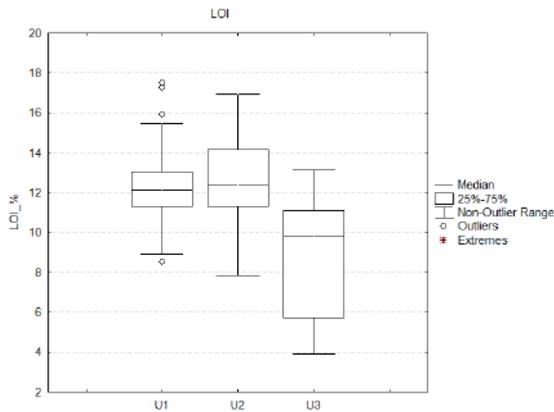


Figura 42. *Box Plot* LOI nos protólitos

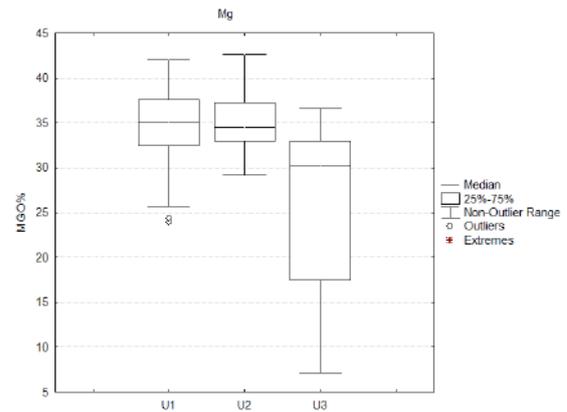


Figura 44. *Box Plot* Mg nos protólitos.

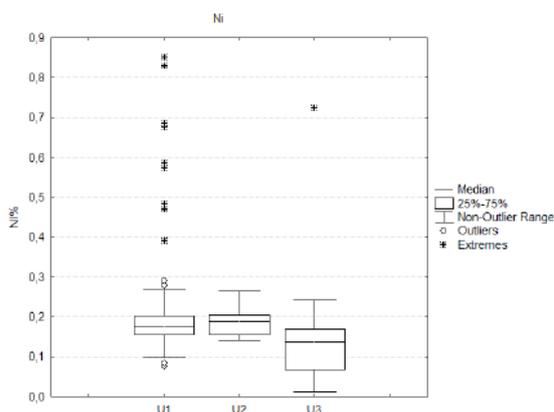


Figura 43. *Box Plot* Ni nos protólitos.

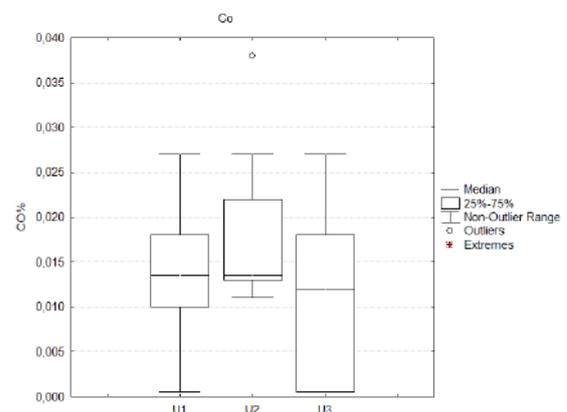


Figura 45. *Box Plot* Co nos protólitos.

4.4 Scatterplots

Os *Scatterplots* permitem traçar relações de proporcionalidade entre os elementos e relacioná-los com as observações feitas anteriormente e com dados bibliográficos.

A análise química dos protólitos deixou claro que alguns elementos são característicos de cada litologia, portanto pudemos utilizar o Al e Ti como marcadores do protólito. Assim, observou-se como os elementos se distribuem com a variação do protólito, o Ni atinge teores maiores onde existe teores Al e Ti baixos (Figura 46), e vice versa. Logo, os piroxenitos representados pelos teores altos de Al e Ti apresentaram menor quantidade de Ni, já observados nos mapas de isovalor. Primariamente essa relação é muito visível diretamente no protólito (Figura 47), mas é perdida ao longo do perfil, no R8 e R7 (Figura 48 e 49) há uma maior mistura de teores que descaracteriza o fator litológico.

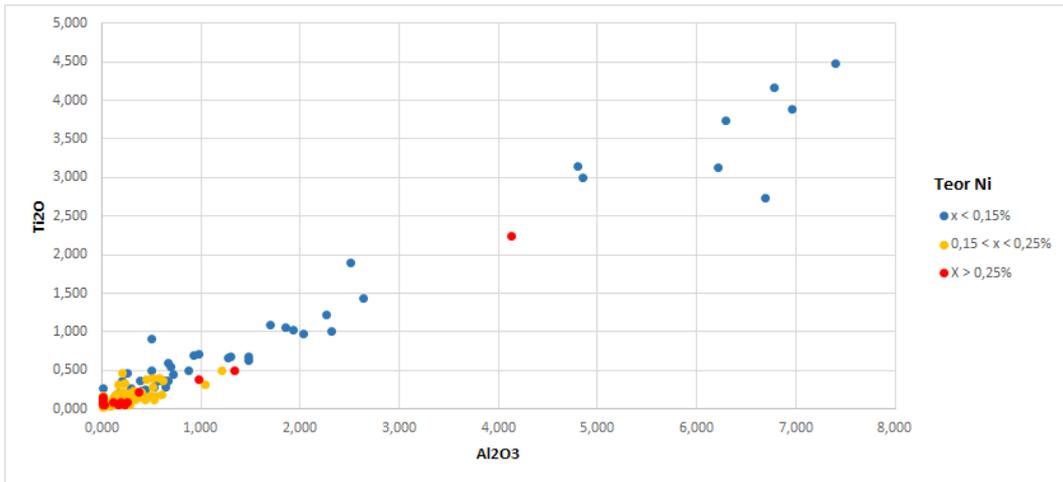


Figura 46. Scatterplot Al₂O₃ x TiO₂ no U, com teores de Ni.

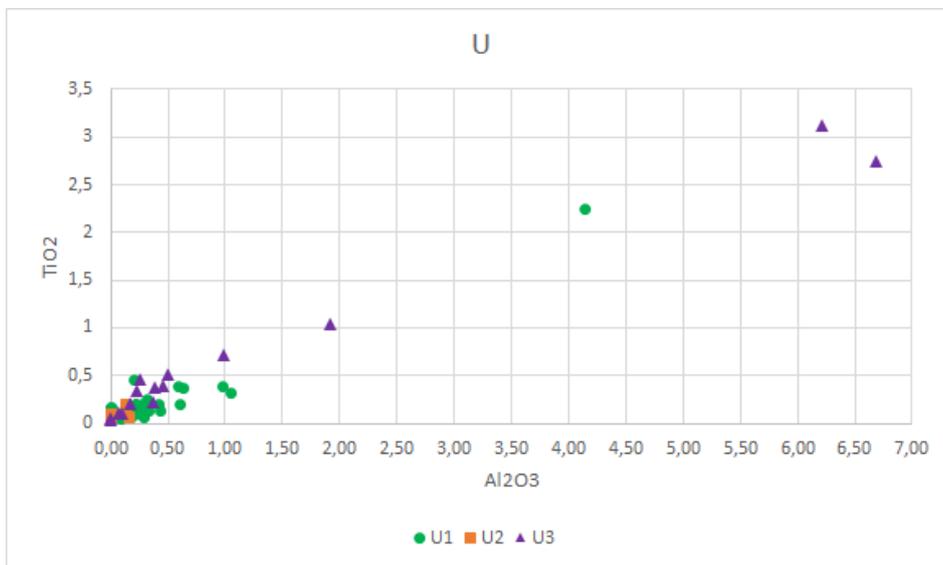


Figura 47. Scatterplot Al₂O₃ x TiO₂ no U, com respectivo protólito discriminado.

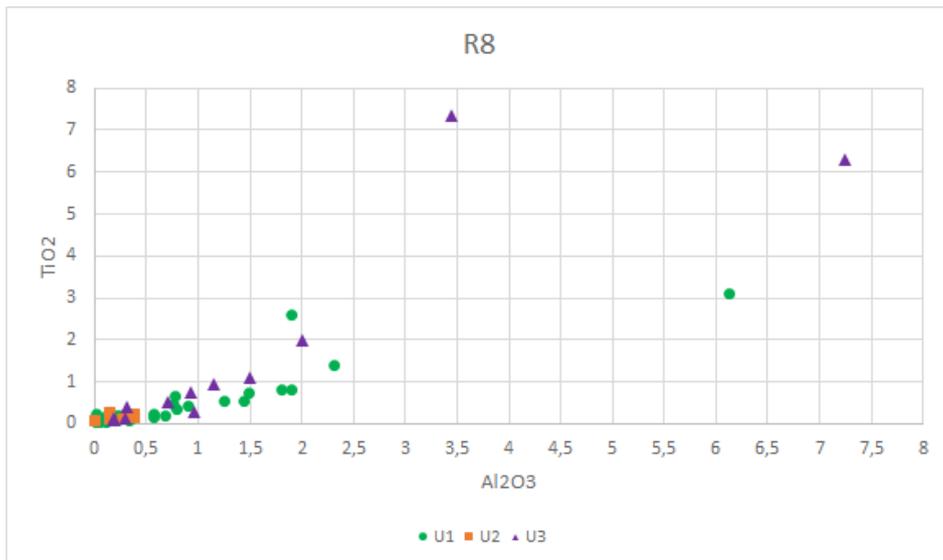


Figura 48. Scatterplot Al₂O₃ x TiO₂ no R8, com respectivo protólito discriminado.

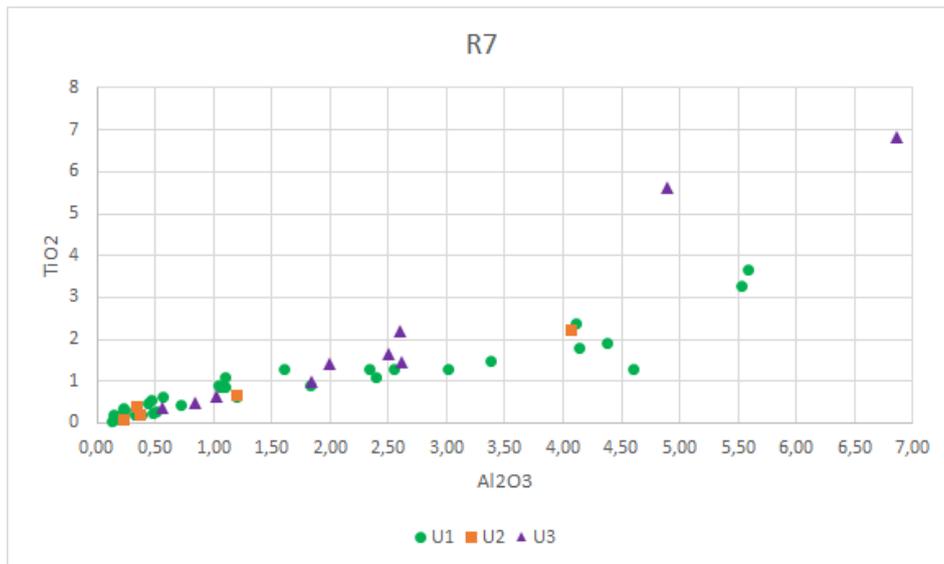


Figura 49. *Scatterplot* Al₂O₃ x TiO₂ no R7, com respectivo protólito discriminado.

Tendo conhecimento do comportamento individual dos elementos dentro dos horizontes, é necessário também entender como tais elementos se relacionam entre si, e as observações consideraram a descrição mineralógica de Barbour (1976) e Oliveira (1980) para o maciço de Santa Fé.

No horizonte superficial a relação mais importante observada, inclusive por representar os elementos de maior abundância, é a do Co com o Fe e mais nitidamente com o Mn, bastante linear nos *scatterplots*. Tal relação estatística com o Mn e Fe é observada de maneira clara nos três horizontes superiores ferruginosos R123, R5 e R6 (Figuras 50-55).

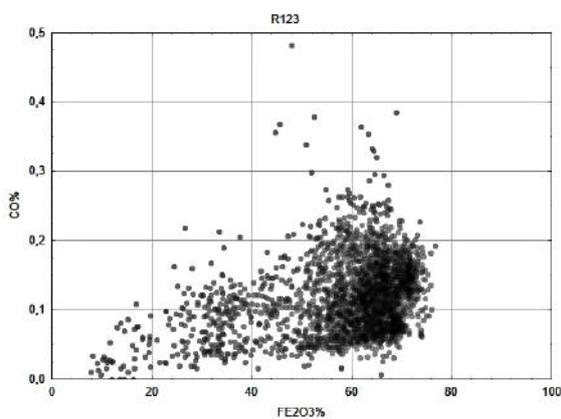


Figura 50. *Scatterplot* Fe₂O₃ x Co no R123.

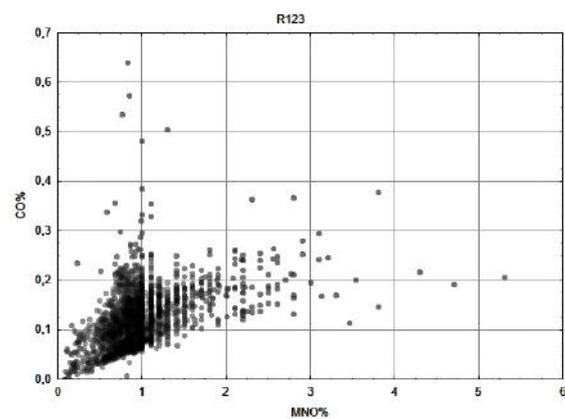


Figura 51. *Scatterplot* MnO x Co no R123.

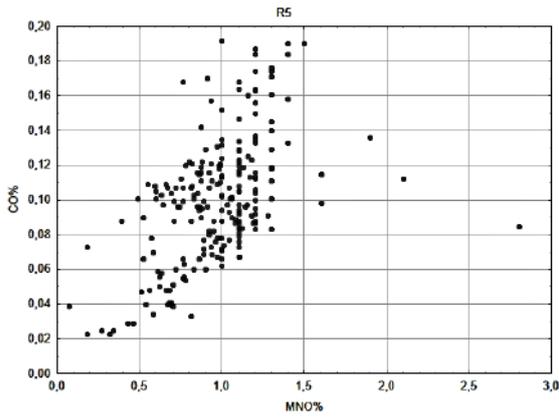


Figura 52. Scatterplot MnO x Co no R5.

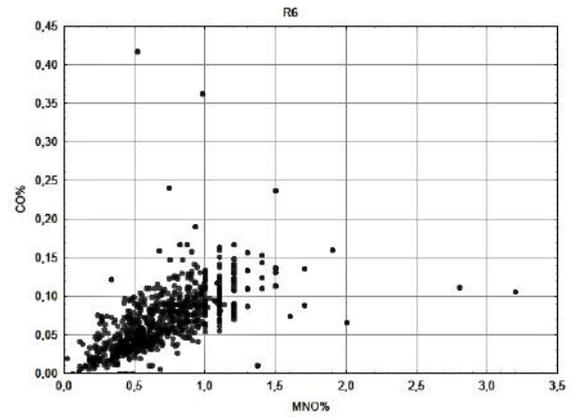


Figura 54. Scatterplot MnO x Co no R6.

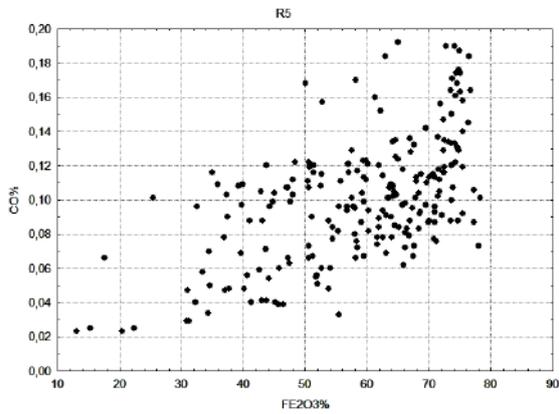


Figura 53. Scatterplot Fe₂O₃ x Co no R5.

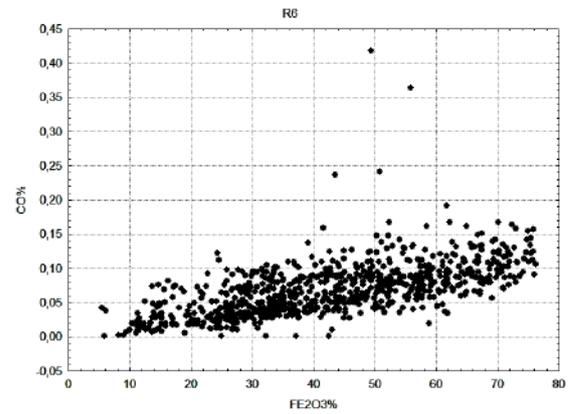


Figura 55. Scatterplot Fe₂O₃ x Co no R6.

Estas observações refletem a mineralogia de minério descrita para os depósitos de Co, onde o Co seria adsorvido na superfície de oxi-hidróxidos de Mn e Fe, relação intensificada na zona oxidada mais superficial. Os gráficos mostram uma proporcionalidade entre o Co e o Fe e Mn, apesar da não proporcionalidade molar do Co nos minerais, situação que não foi observada nos mapas.

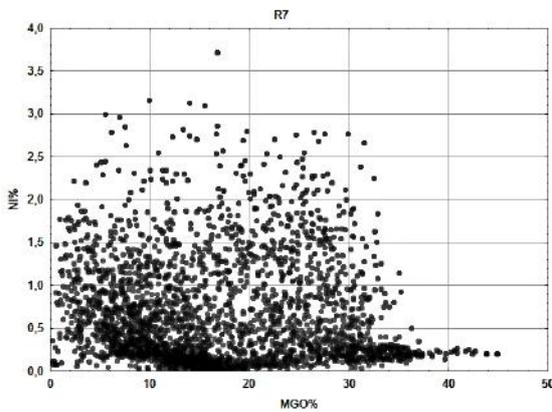


Figura 56. Scatterplot MgO x Ni no R7.

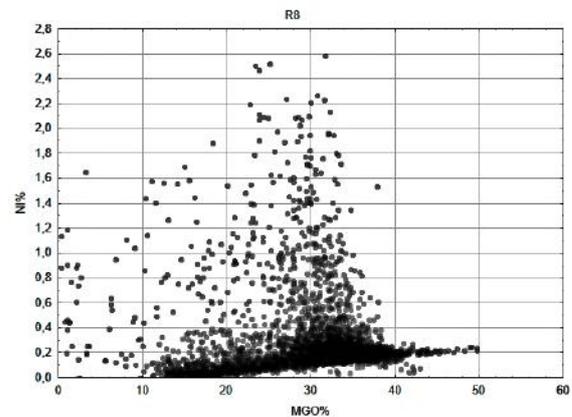


Figura 57. Scatterplot MgO x Ni no R8.

Inicialmente do protólito até o R7, há uma relação dispersa do Ni com o Mg, não há proporcionalidade, o enriquecimento em Ni acontece em faixas específicas de teores de Mg, um limite de aproximadamente 35% nas Figuras 56-58, teores que estão dentro das faixas de teor de Mg da serpentina, mineral mais abundante descrito para estes horizontes, e médias ligeiramente menores de Mg nas cloritas, cada vez mais abundantes próximo ao R7.

Já para as Figuras 59 e 60 (R5 e R6) percebe-se um afastamento das fases magnesianas, devido ao enriquecimento do Ni acontecer em faixas de teor de Mg bem menores, seja pela lixiviação do Mg nestes horizontes, seja pela substituição das fases portadoras do Ni na zona oxidada dos silicatos hidratados para a goetita.

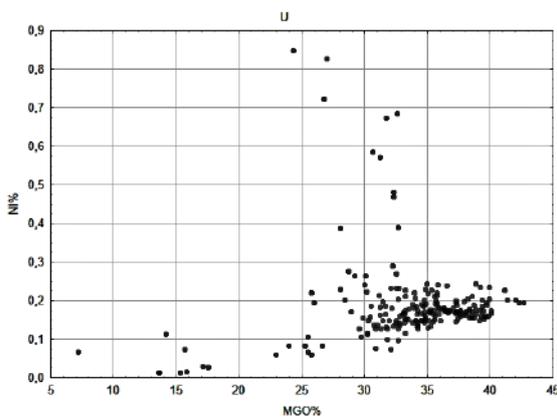


Figura 58. Scatterplot MgO x Ni no U.

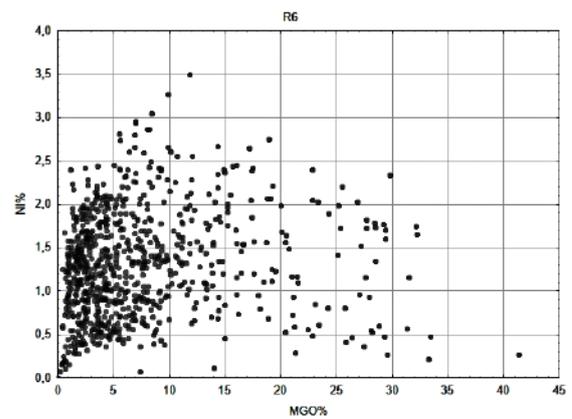


Figura 60. Scatterplot MgO x Ni no R6.

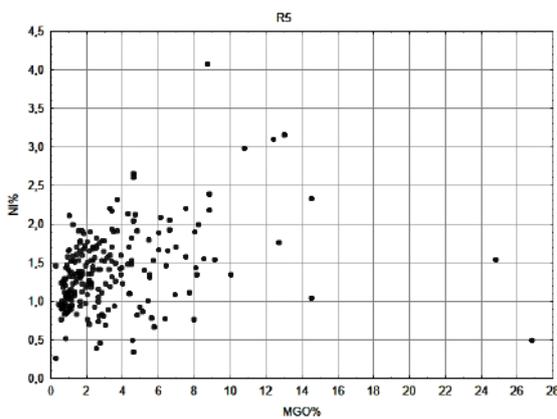


Figura 59. Scatterplot MgO x Ni no R5.

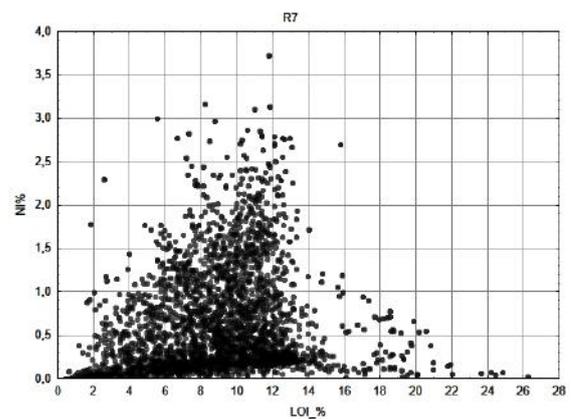


Figura 61. Scatterplot LOI x Ni no R7.

O LOI se comporta de maneira muito similar ao Mg quando comparado ao Ni, pois representa a hidratação dos silicatos magnesianos e hidróxidos. O mesmo limite de enriquecimento do Ni dos horizontes R7, R8 e U pode ser observado nas Figuras 61 a 63, onde o Ni atinge maiores teores nas faixas de LOI entre 12-14%, teores médios de

hidratação das serpentinas e cloritas. Com a desidratação gradual do perfil, os maiores teores de Ni se concentram ligeiramente em faixas menores de LOI (Figuras 64 e 65), próximos às faixas de hidratação de 10%, valores referentes a hidratação da goetita, o principal mineral portador do Ni na zona oxidada.

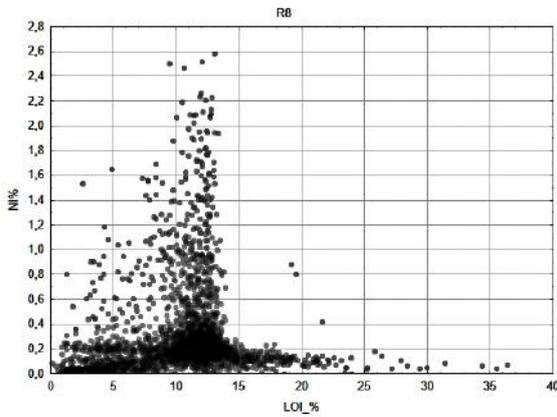


Figura 62. Scatterplot LOI x Ni no R8.

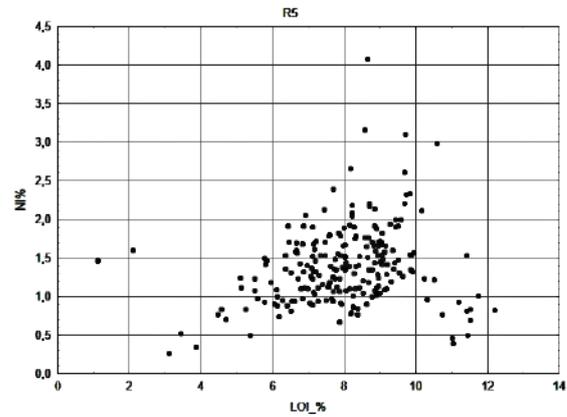


Figura 64. Scatterplot LOI x Ni no R5.

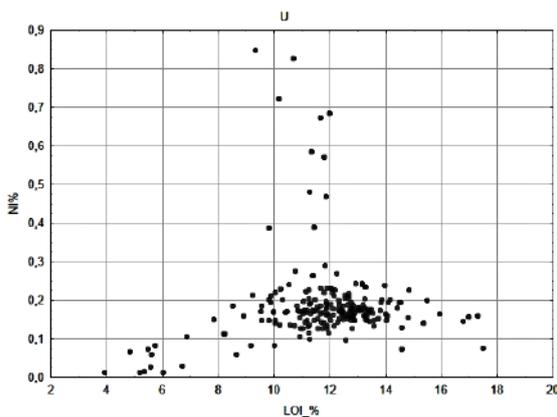


Figura 63. Scatterplot LOI x Ni no U.

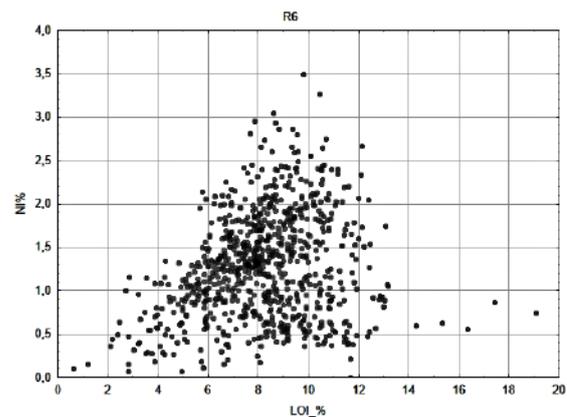


Figura 65. Scatterplot LOI x Ni no R6.

Os gráficos LOI x Mg contém as retas que apresentam a proporção média entre Mg e LOI correspondente a serpentina (Serp) e clorita (Chlo). Devemos considerar que as análises são de rocha total, e não representam uma composição de serpentina e clorita exclusivamente. Especialmente no U (Figura 66), observamos um desvio da linha de tendência dos pontos a direita da reta da serpentina que deveria ser o mineral mais abundante no protólito, mas a vermiculita mineral hidrotermal extensamente citado por Barbour (1976) e Oliveira (1980) oferece valores da ordem de 17% de hidratação e possivelmente desvia a média de valores de LOI das análises, tornando-as mais enriquecidas em LOI, apesar de ser um mineral acessório.

Os maiores teores de Ni se concentram mais a direita da tendência dos pontos no R7 (Figura 67), indicando teores de Ni maiores em zonas mais cloríticas do horizonte; os

maiores teores refletem a maior capacidade de enriquecimento da clorita em Ni em comparação a serpentina. A maior abundância de clorita no R7 se deve a maior estabilidade nas condições com menores proporções de magnésio, situação que se agrava quanto mais perto do topo do perfil.

O R8 (Figura 68), ao contrário do R7, apresenta sua linha de tendência mais próxima da serpentina, assim como seus maiores teores, demonstrando suas características ainda imaturas, mais parecidas com o protólito, mais serpentínico.

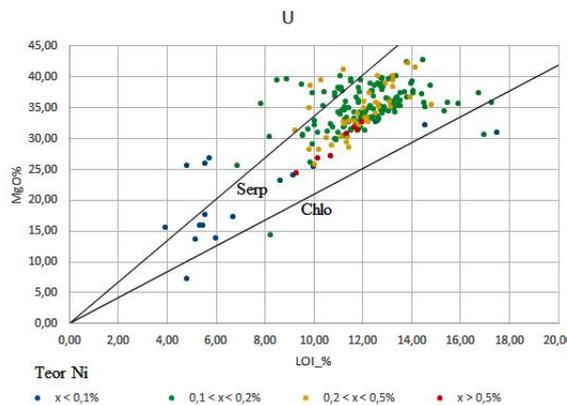


Figura 66. Scatterplot LOI x MgO no U, não corrigido para LOI.

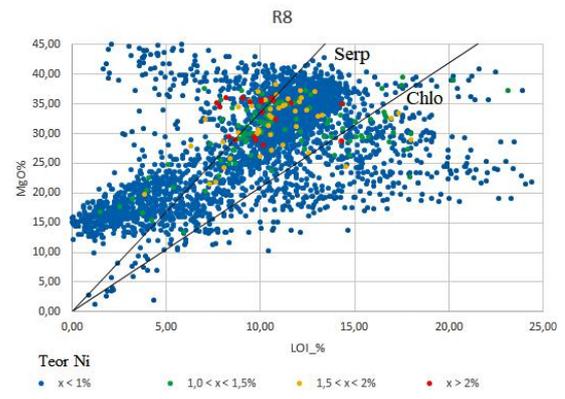


Figura 68. Scatterplot LOI x MgO no R8, LOI corrigido para Fe₂O₃.

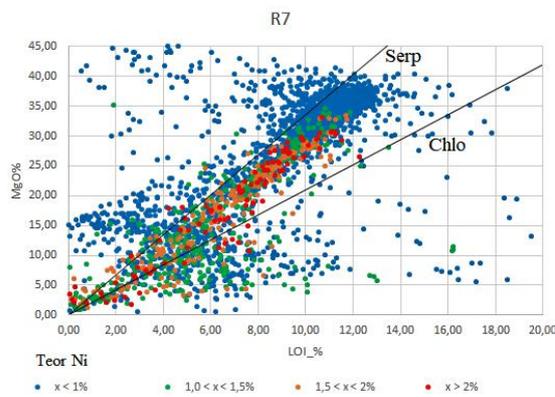


Figura 67. Scatterplot LOI x MgO no R7, LOI corrigido para Fe₂O₃.

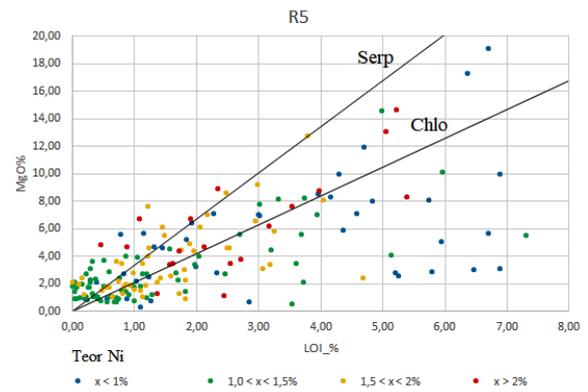


Figura 69. Scatterplot LOI x MgO no R5, LOI corrigido para Fe₂O₃.

Ainda é possível constatar o efeito dos silicatos magnesianos no horizonte oxidado (Figuras 69 e 70), ainda que haja a predominância de óxidos. A correção para os óxidos foi necessária para visualizar a influência dos silicatos no R5 e R6. No R6 a tendência se aproxima levemente da clorita em relação ao R7, mostrando a desestabilização da serpentina para a clorita, da base para o topo do perfil.

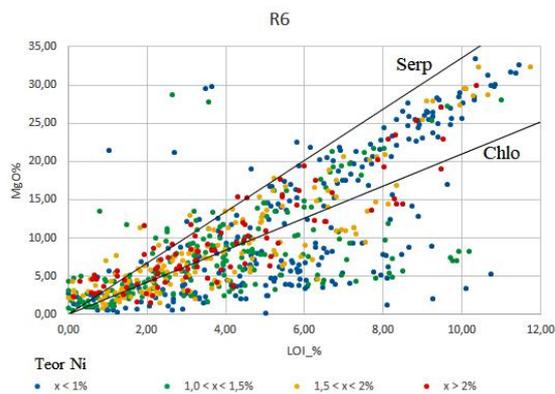


Figura 70. Scatterplot LOI x MgO no R6, LOI corrigido para Fe₂O₃.

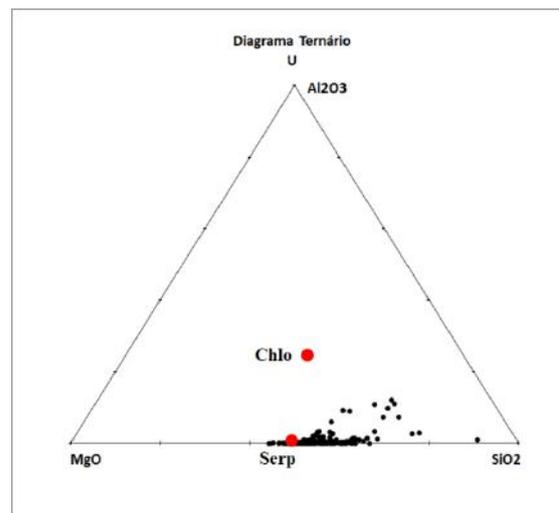


Figura 71. Diagrama ternário do U.

Nos diagramas ternários, inicialmente no U (Figura 71), constatamos as duas famílias de pontos destacados anteriormente, o grupo depletado em Al, referente aos dunitos, com composição próxima da composição média da serpentina, e alguns pontos mais aluminosos e silicáticos, refletindo o piroxenito.

Mais acima no perfil, o R8 já demonstra os efeitos da lixiviação mais acelerada do Mg, tornado-se mais silicático relativamente, mas ainda respeitando as proporções próximas da serpentina (Figura 72), como visto na Figura 68 anteriormente.

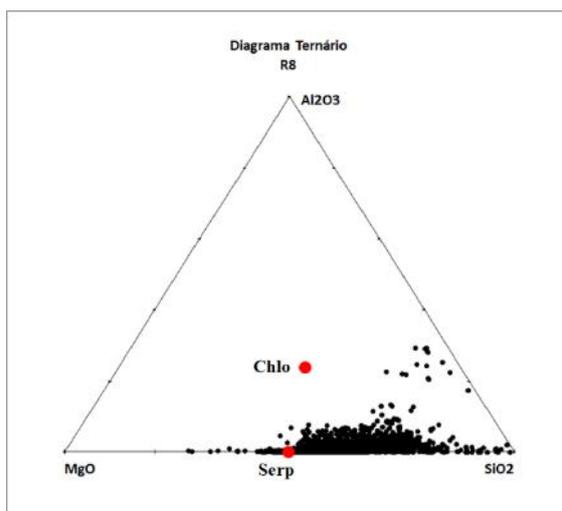


Figura 72. Diagrama ternário do R8.

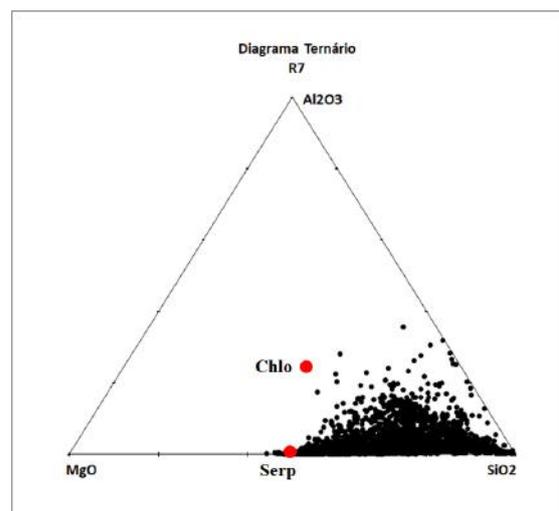


Figura 73. Diagrama ternário do R7.

A cloritização do R7 se tornou ainda mais evidente nos gráficos ternários, haja vista uma nuvem de pontos se enriquecendo em Al em relação ao R8, ficando entre 10 e 20% de Al, relativamente (Figura 73). A cloritização deste horizonte é consequência do fornecimento maior de Al e menor de Mg, tornando-a mais estável que a serpentina, como já citado anteriormente. O total afastamento da serpentina acontece no R5 e R6 devido ao empobrecimento do Mg e SiO₂, e relativo enriquecimento em Al, se aproximando da composição média da clorita (Figuras 74 e 75). As análises neste horizonte já se encontram muito depletadas em Mg, por isto o afastamento da clorita para a direita do gráfico. Os pontos não atingem os teores de clorita devido a ela não se tornar predominante no R7, e no R6 já perder espaço pra goetita, durante a oxidação. Vale lembrar que as análises são para rocha total, portanto levam em consideração todo o complexo mineral dos horizontes.

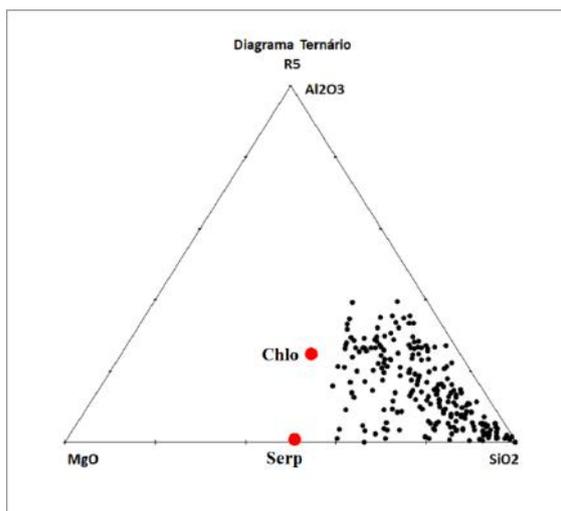


Figura 74. Diagrama ternário do R5.

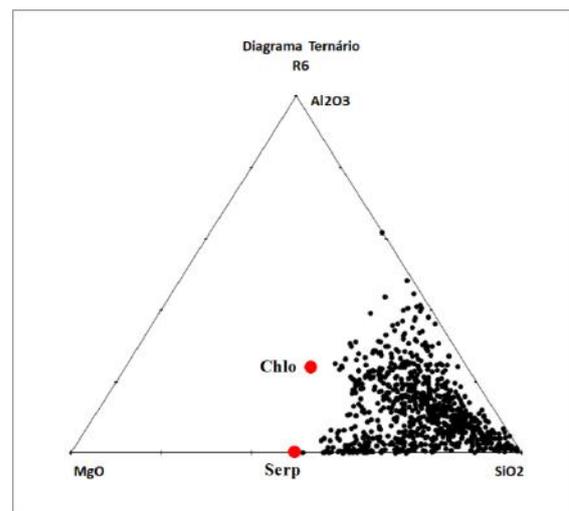


Figura 75. Diagrama ternário do R6.

A relação de hidratação dos minerais também pode ser constatada no gráfico LOI x Al (Figuras 76 a 78), onde os altos valores de Al, associados a clorita (17-24% de hidratação), obedecem o mesmo limiar de água estrutural de aproximadamente 13% no R7 e R8; e no U os maiores valores de Al estão com teores de LOI baixos, que como visto anteriormente estão associados ao protólito piroxenítico, como já citado possui menor grau de hidratação devido a menor serpentinização.

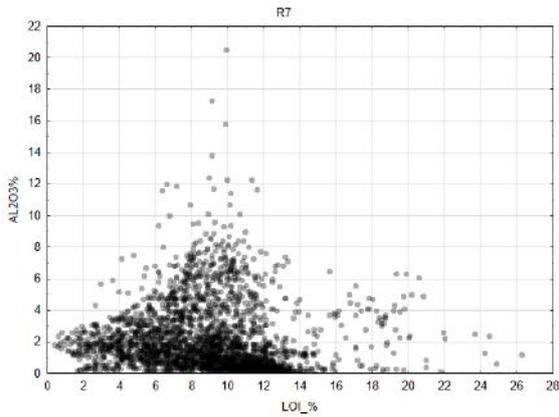


Figura 76. Scatterplot LOI x Al₂O₃ no R7.

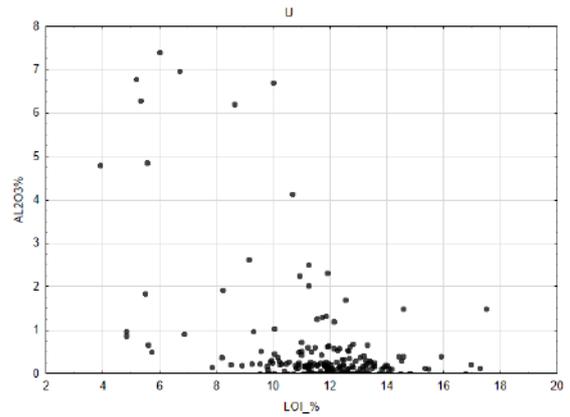


Figura 78. Scatterplot LOI x Al₂O₃ no U.

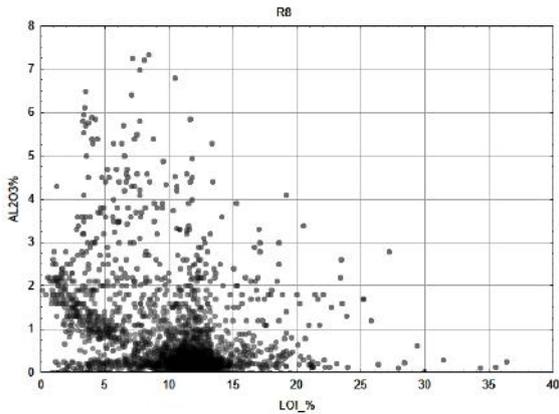


Figura 77. Scatterplot LOI x Al₂O₃ no R8.

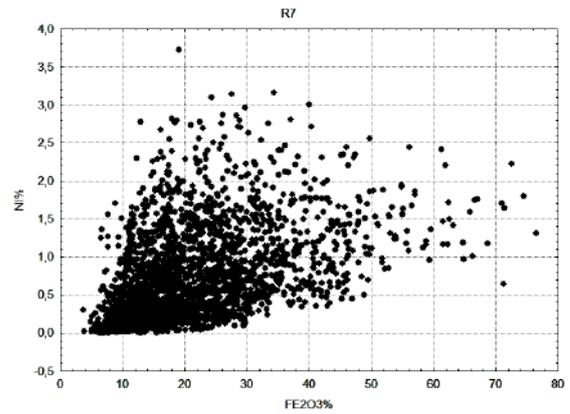


Figura 79. Scatterplot Fe₂O₃ x Ni no R7.

O padrão ferruginoso oxidado dos horizontes superiores é constatado nos gráficos Fe x Ni, onde podemos observar a variação dos teores de Fe no perfil saindo de concentrações abaixo de 35% no R7 (Figura 79), para teores cada vez maiores no R5 e R6 (Figuras 80 e 81), até atingir concentrações acima de 50% no R123 (Figuras 82). Os valores de Ni se distribuem sem uma correlação positiva ou linear, suas concentrações não obedecem uma proporção de Fe específica.

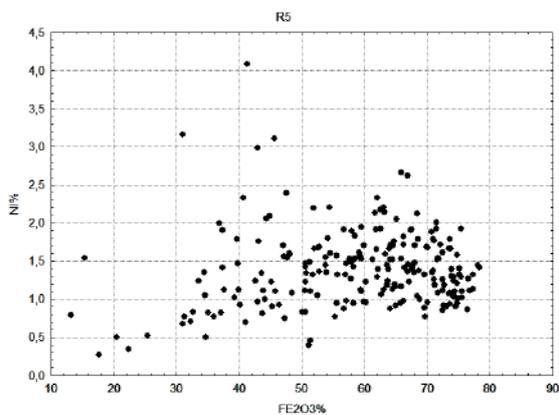


Figura 80. Scatterplot Fe₂O₃ x Ni no R5.

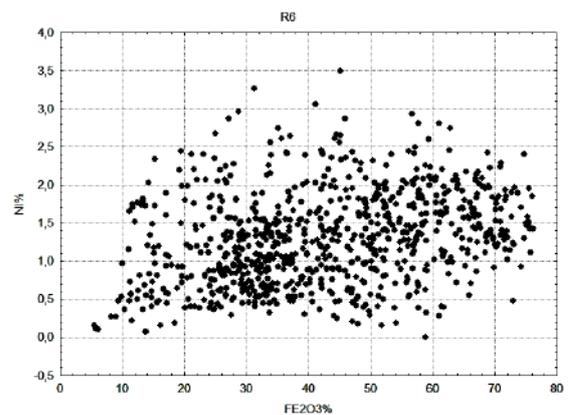


Figura 81. Scatterplot Fe₂O₃ x Ni no R6.

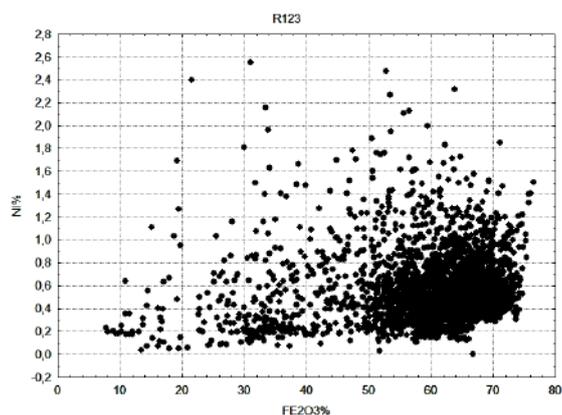


Figura 82. Scatterplot Fe₂O₃ x Ni no R7.

O portador do Ni no horizonte oxidado R5 e R6 é principalmente a goetita, o Ni nesse caso pode: ser adsorvido nos retículos do mineral e/ou substituir o Fe na estrutura cristalina. O padrão de adsorção é maior quanto pior for a cristalização da goetita, isto é, conforme a goetita vai se recristalizando ao longo do topo do regolito, ela vai liberando o Ni para o sistema. A não linearidade dos *scatterplots* mostra a variada capacidade de adsorção do Ni, e não está relacionado apenas a proporcionalidade molar dos minerais.

	Co			Perfil	Ni		
	% massa	T x E	Mediana		Mediana	T x E	% massa
██████████	57%	0,420 %m	0,118 %	R123	0,580 %	2,058 %m	26%
█	3%	0,025 %m	0,096 %	R5	1,431 %	0,379 %m	5%
██	9%	0,069 %m	0,073 %	R6	1,351 %	1,279 %m	16%
████	17%	0,124 %m	0,035 %	R7	0,836 %	2,992 %m	38%
█████	13%	0,096 %m	0,020 %	R8	0,220 %	1,076 %m	14%
		%m	0,013 %	U	0,174 %	%m	

Figura 83. Aproximação do percentual da massa dos elementos para cada horizonte, “T x E” foi calculado pela mediana do teor multiplicado pela espessura média, para regiões com horizonte ausente foi adotado 0 m.

Pudemos observar na Figura 83 como o Ni consegue atingir teores maiores na zona oxidada R56 (~1,39% Ni), mas esse horizonte não possui muita representatividade volumétrica no perfil, R5 e R6 possuem reduzida espessura (Figura 84) e área (como visto nos mapas geoquímicos) e acabam alocando a menor parte da massa do Ni do regolito, apesar de bons teores. Neste caso o Ni migrou em maior parte para o horizonte inferior, com 38% em massa no R7 (Figura 83).

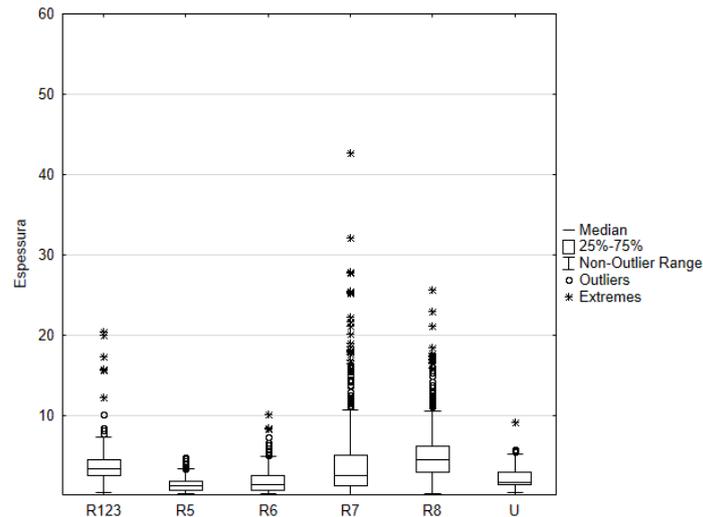


Figura 84. *Box Plots* para espessuras dos horizontes. Nota: Desconsideram os furos de sondagem que não possuem o horizonte.

Os horizontes superiores no R123 podem nos induzir que são um bom concentrador do Ni pela análise de massa da Figura 83, mas devemos considerar o peso que o volume desse horizonte causa, eles possuem uma boa espessura e a maior área, por isso a falsa sensação de enriquecimento do Ni, na realidade possuem uma mediana de teores muito baixa para o interesse econômico (0,58% Ni).

Além disso, podemos acrescentar que segundo Ogura (1983) os pisólitos formados próximos à superfície da laterita criam uma estrutura que aprisiona alguns elementos que seriam lixiviados, logo apresentam concentrações maiores de Ni, Co e Mn se comparado à matriz da laterita na zona superior, reduzindo o potencial de concentração do Ni nos níveis do saprólito como de costume. Esta teoria explica o resquício de Ni no R123, haja vista a presença de pisólitos descritos para o regolito de Santa Fé.

Bernardelli (1983) também descreve processo parecido e afirma que nos depósitos de Ni laterítico de Carajás a migração do Ni foi barrada pela formação de silcrete, que reduz a permeabilidade vertical do perfil, tais processos podem atuar com intensidade diferentes no perfil de Santa Fé e alterar a migração do Ni.

O mesmo não pode se dizer para o Co que apresenta os melhores teores (0,12% Co) no horizonte R123 e unido ao volume do mesmo, acumulam quase 60% da massa de Co do perfil (Figura 83).

5 Conclusões

Os fatores controladores do Ni ficam bem claros durante a análise, mas é complexo e difícil mensurar qual o grau de influência de cada fator, além de cada caso os fatores oferecerem papéis mais ou menos importantes. Apesar disso, pudemos descrever sua distribuição através destes fatores de maneira concomitante.

O Ni apresenta uma distribuição que não permite definir o depósito como apenas de um tipo, observamos que ele possui uma distribuição desde a zona silicatada (R7) até a zona oxidada (R5). O dunito favoreceu a formação de um espesso horizonte oxidado, e os maiores teores estão contidos na base dessa zona (R5 e R6), mas os maiores volumes estão alocados na zona silicatada (R7), portanto o depósito seria do tipo silicatos hidratados com depósito oxidado secundário.

Na zona silicatada, o Ni aparece relacionado ao Mg, mas depende da lixiviação do Mg para poder se fixar nos silicatos hidratados magnesianos, vale salientar que o Ni é descrito como elemento acessório em diversos minerais do tipo silicato hidratado, portanto os *trends* nessa zona são de difícil compreensão e interpretação, mas obedecem a faixa de hidratação e teor de Mg para os minerais clorita e serpentina, minerais descritos mais comuns na zona silicatada (Andrade e Silva, 1980) e comumente portadores do Ni na zona silicatada.

Nessa zona a influência topográfica é menor e a mobilidade lateral do Ni menor, mas atinge os maiores teores em regiões mais elevadas e adjacentes a gradientes elevados, devido a maior taxa de lixiviação e maior poder concentrador que conseqüentemente estas condições submetem o regolito. A topografia demonstrou ser fator importante na formação do depósito quando associado com uma geoquímica favorável.

O protólito apresentou a maior influência na distribuição do Ni, nos indicando a importância de uma rocha com teores maiores para o desenvolvimento de jazidas desse tipo, tanto litologicamente quanto geoquimicamente, como foi observado nas variações químicas dentro do dunito amostrado, e entre o dunito e o piroxenito.

Os piroxenitos em destaque apresentam características químicas com expressiva variação para Ni, Co, Al e Ti. E mostra como isto vai reduzir seu potencial de acumulação do Ni, visto claramente nos mapas, *box plots* e *scatterplots*. É um fator determinante no desenvolvimento do depósito, pois o piroxenito apresentou potencial muito baixo para desenvolver teores satisfatórios, mesmo sob condições de concentração boas, como clima e topografia favoráveis.

A importância da geoquímica do protólito ficou clara pois mesmo sob condições menos favoráveis de formação do depósito, as regiões mais enriquecidas do dunito atingiram teores satisfatoriamente elevados; e em regiões mais favoráveis para concentração do Ni mas sobre as regiões mais empobrecidas em Ni, tanto no dunito quanto no piroxenito não desenvolveu-se teores elevados.

Na zona oxidada a relação do Ni com o Fe é acentuada e sua concentração controlada pela distribuição do Fe, principal portador é a goetita que se refletiu nos *scatterplots* e no teor de hidratação diferente da zona silicatada. Tal relação não significou que para as regiões enriquecidas em Fe havia um correspondente enriquecimento de Ni, obviamente os óxidos de Fe estão submetidos ao controle litológico e o fornecimento de Ni do protólito. A mobilidade lateral do Ni na zona oxidada é mais acentuada e começa a sofrer mais influência da topografia e gradiente nesta zona, como ficou claro para todo o regolito, as regiões mais altas e aplainadas também apresentaram teores mais elevados.

Concordante ao modelo padrão da zona oxidada, o regolito de Santa Fé apresentou teores dentro do padrão, se comparada a outros depósitos do mesmo tipo. Já havia sido colocado que protólitos duníticos e regiões menos elevadas e mais aplainadas facilitariam a formação desse tipo de depósito, haja vista que dunitos possuem menos SiO₂ que as outras rochas ultramáficas, e um lençol freático mais próximo ao perfil facilitaria a intemperização dos minerais silicáticos de maneira mais generalizada.

O cálculo relativo de massa demonstrou que a zona silicatada (R7) possui os maiores volumes do *commodity*, apesar de possuir teor médio menor (0,84% Ni) que a zona oxidada (1,39% Ni) (R5 e R6), o R7 apresenta preservação maior em espessura (média de 4,3 m) e área. A concentração de Ni superior na zona oxidada em relação a silicatada é incomum se comparado aos dados fornecidos por Brand *et al* (1996) e Gleeson *et al* (2003). Cabem estudos para determinar quais os fatores que favoreceram a melhor concentração da zona oxidada.

O Co de maneira muito mais simplificada obedeceu o comportamento padrão descrito amplamente na bibliografia de regolitos de outras áreas. Como um elemento residual, se concentra para o topo do perfil e associa-se aos minerais mais abundantes nessa zona, óxidos de Mn e em menor escala nos de Fe, os *trends* dos gráficos binários deixaram isto muito claro, além dos picos enriquecidos no mapas de Co e Mn serem coincidentes. O Co é descrito como adsorvido na superfície destes minerais portanto não existe um equilíbrio molar que controle o teor de Co nos minerais. Assim seus picos não

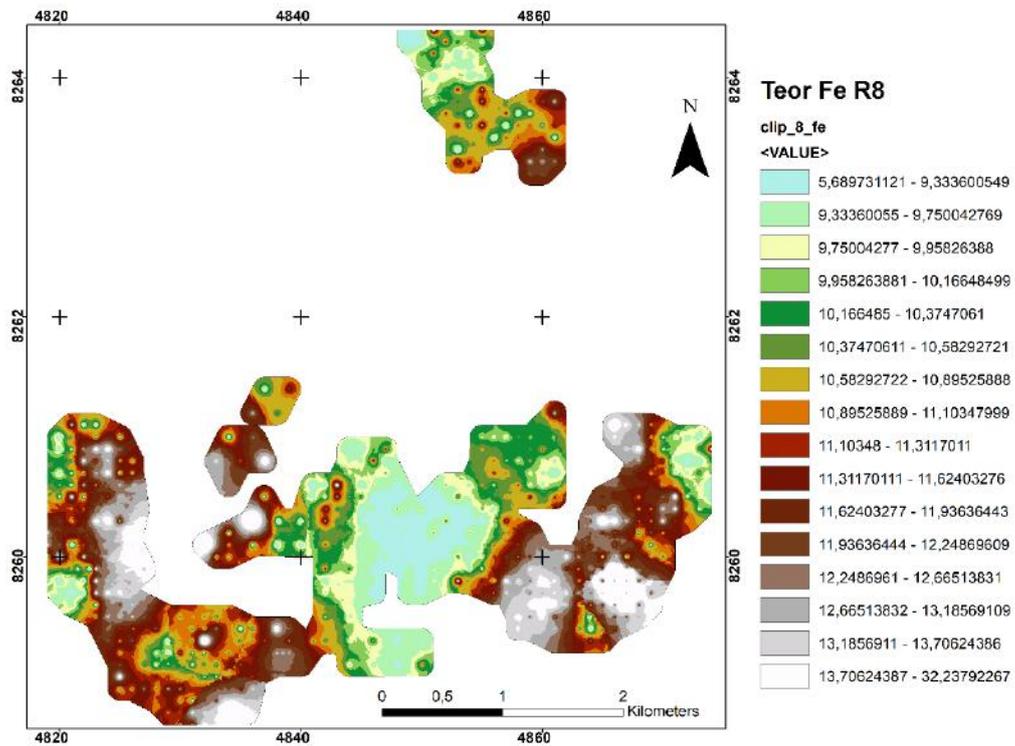
são proporcionais ao Mn. Também é importante ressaltar que por ser um elemento residual a ancestralidade do protólito é crucial para o enriquecimento do Co no perfil como observado nos mapas.

A projeção de massa esboçada na Figura 83 deixa bem claro que a única zona que contém o Co de maneira significativa é o R123, tanto em volume (3,6 m de espessura média e maior área) quanto em teores aceitáveis para exploração (0,12% Co). Recomenda-se estudos mais profundos que discriminem o horizonte R123, e faça o cálculo de cubagem para esta *commodity* na zona oxidada superior.

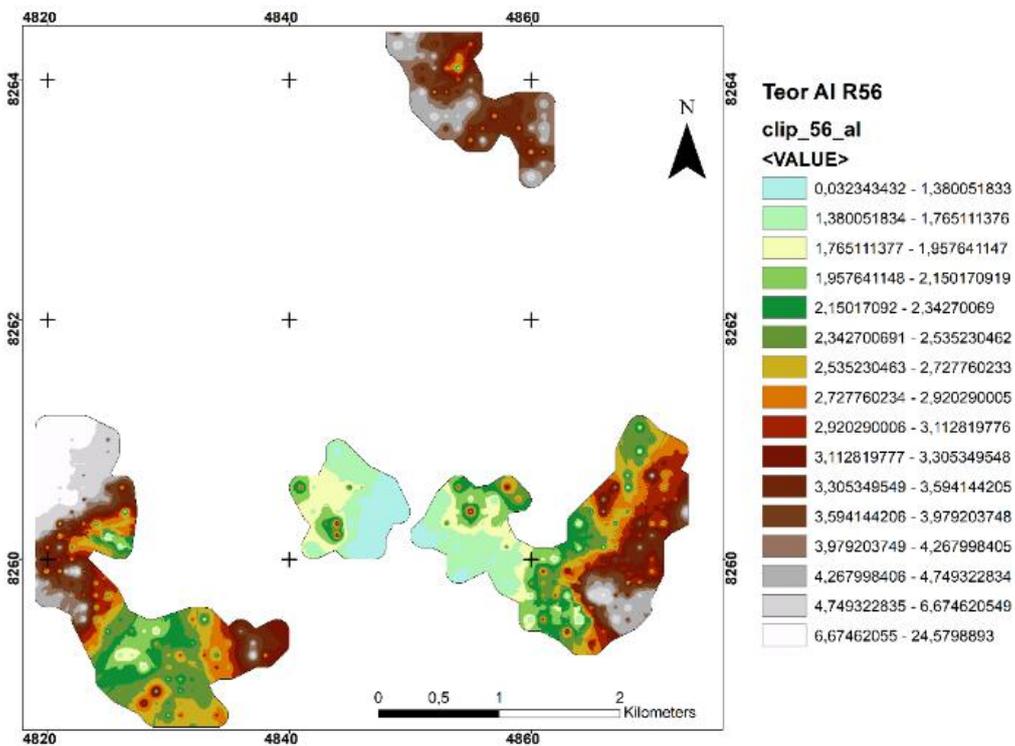
6 Bibliografia

- Andrade e Silva, A.C.G. de, 1980, Mineralogia, material amorfo, evolução genética e estudo do Ni e cromo no perfil de alteração do maciço ultramáfico de Santa Fé, Goiás. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, p. 136.
- Barbour, A. P., 1976, Geologia do Maciço Ultramáfico de Santa Fé, Goiás. Tese, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, p. 138.
- Barbour, A. P. and Hypolito, R., 1983, Geological aspects of laterisation and superficial geology of a mafic-ultramafic alkaline complex in central Brazil. II Internacional Seminar on Lateritisation Processes, p. 137-146.
- Bernardelli, A., 1983, The Carajás nickel deposits. II Internacional Seminar on Lateritisation Processes, p. 107-118.
- Boeglin, J.L., 1983, Early formed mineral parageneses in the deep zones of supergene ores in lateritic weathering. II Internacional Seminar on Lateritisation Processes, p. 71-88.
- Brand, N.W., Butt, C.R.M. and Hellsten, K.J., 1996, Structural and lithological controls in the formation of the Cawse nickel laterite deposits, Western Australia – Implications for supergene ore formation and exploration in deeply weathered terrains. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Publication Series v. 6/96, p. 185-190.
- Brand, N.W., Butt, C.R.M., and Elias, M., 1998, Nickel laterites: Classification and features. AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics, v.17, p. 81–88.
- Childs, C., July-September 2004 Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst. ArcUser, pag 32-35.
- Deer, W.A., Howie, R.A., and Zussman, J., An introduction to the Rock-Forming Minerals. Ed. 7th, London, p. 528, 1978.
- Gleeson, S.A., Butt, C.R.M. and Elias, M., 2003, Nickel laterites: A review. SEG Newsletter, nº 54.
- Golightly, J.P., 1981, Nickeliferous laterite deposits. Economic Geology 75th Anniversary Volume, p. 710–735.
- Nahon, D.B., and Tardy, Y., 1992, The ferruginous laterites, in Butt, C.R.M., and Zeegers, H., eds., Regolith exploration geochemistry in tropical and subtropical terrains: Handbook of exploration geochemistry 4. Amsterdam, Elsevier, p. 41–55.

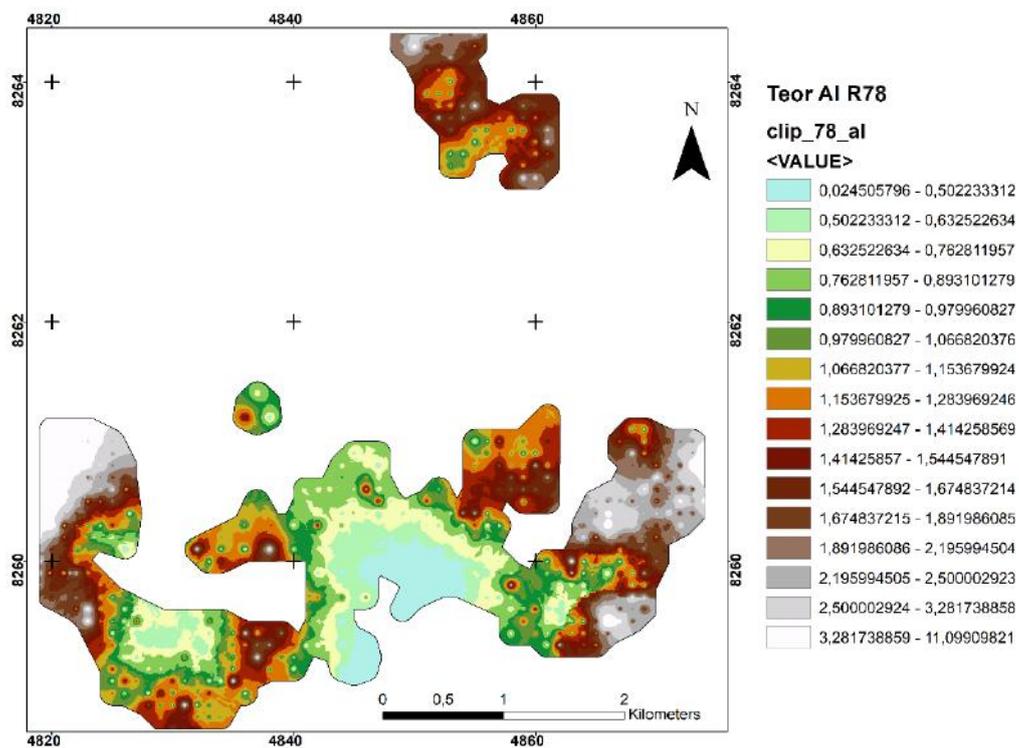
- Ogura, Y., 1983, Mineralogical studies on the occurrence of pisolites in the nickeliferous laterite deposit of the Rio Tuba Mine, Philippines. II Internacional Seminar on Lateritisation Processes, p. 89-105.
- Oliveira, S.M.B., 1980, Alteração intempérica das rochas ultrabásicas de Santa Fé e gênese do depósito niquelífero. Tese, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, p. 216.
- Oliveira, S.M.B. and Trescases, J.J., and Melfi, A.J., 1992, Lateritic nickel deposits of Brazil. *Mineralium Deposita*, v. 27, p. 137–146.
- Riva, E.M., 2011, Modelagem do levantamento batimétrico da região do Parque Municipal Marinho do Recife de Fora, Porto Seguro – BA. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, p. 60.
- Schellmann, W., 1983, Geochemical Principles of Lateritic Nickel Ore Formation. II Internacional Seminar on Lateritisation Processes, p. 119-135.
- Trescases, J.J., 1973, Weathering and geochemical behavior of the elements of ultramafic rocks in New Caledonia. Bureau of Mineral Resources, Australia, v. 141, p. 149-163
- Trivedi, P., and Axe, L., 2001, Ni and Zn sorption to amorphous versus crystalline iron oxides: Macroscopic studies. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 244, p. 221–229.



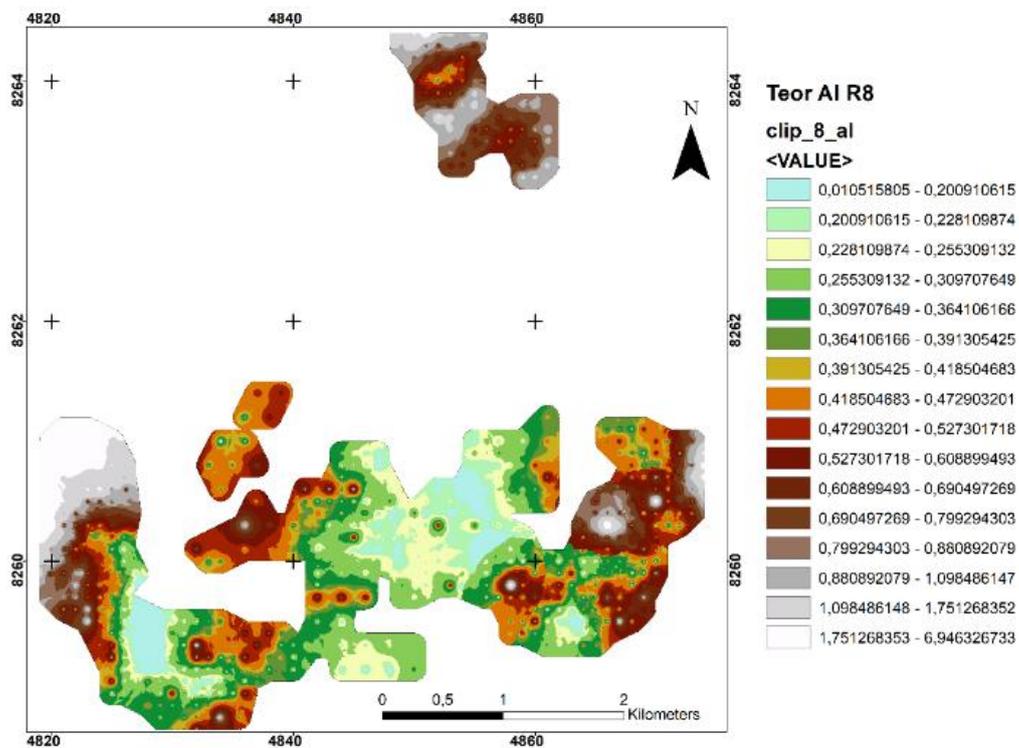
3. Mapa de Isovalor Fe no R8.



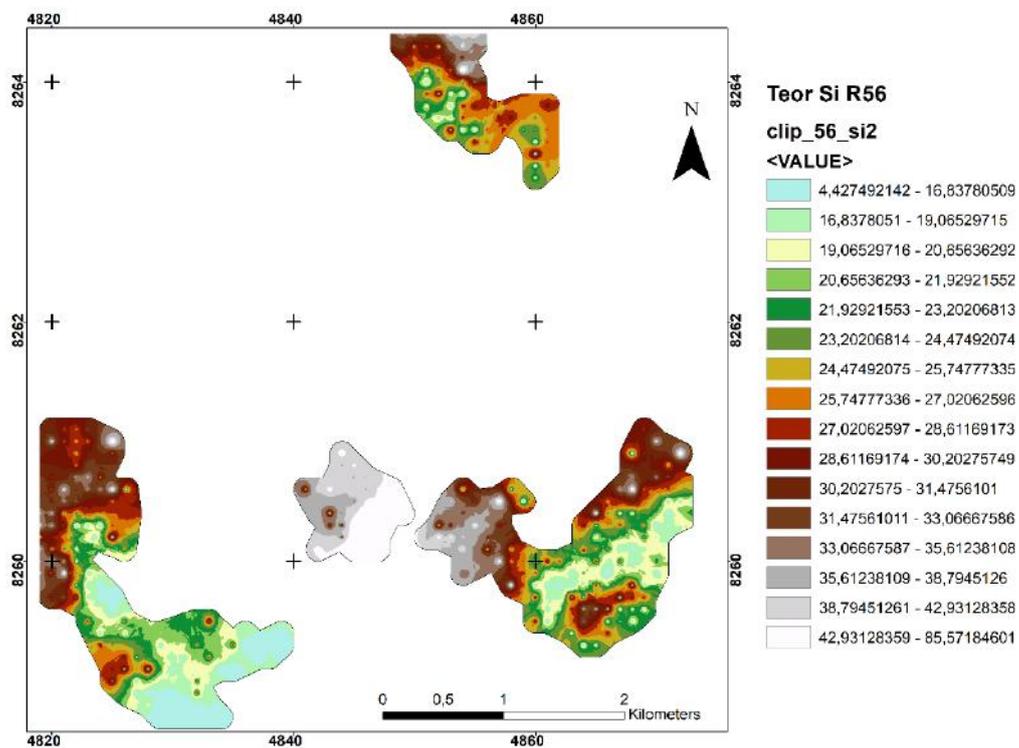
4. Mapa de Isovalor Al no R56.



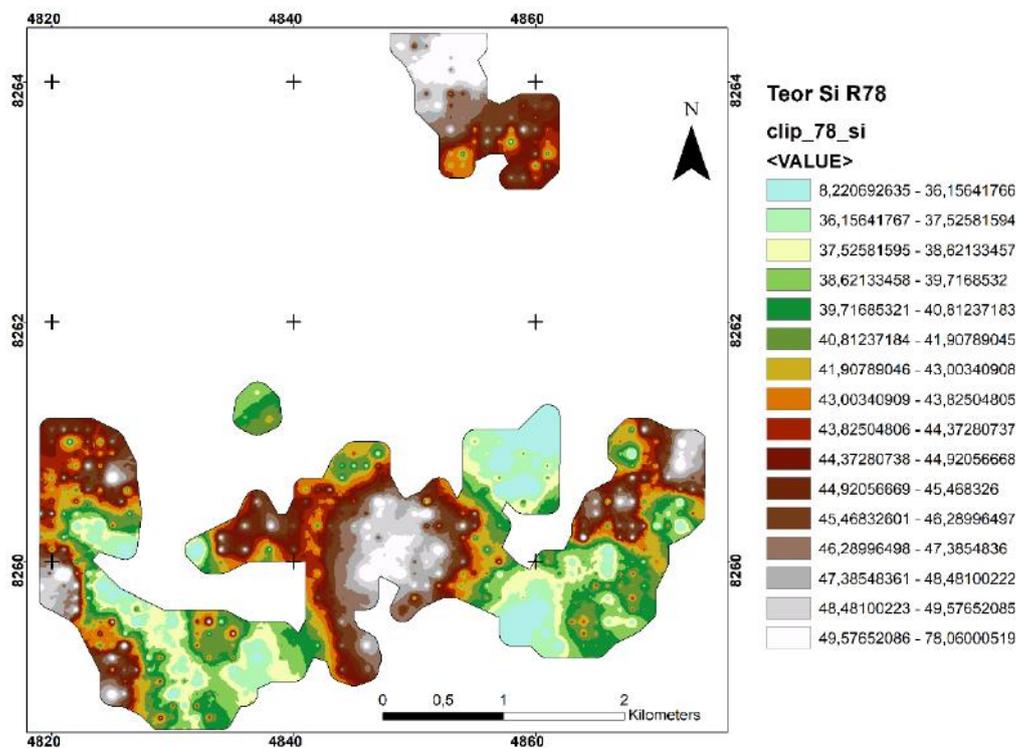
5. Mapa de Isovalor AI no R78.



6. Mapa de Isovalor AI no R8.



7. Mapa de Isovalor SiO₂ no R56.



8. Mapa de Isovalor SiO₂ no R78.