



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**GUSTAVO NEGRELLO BERGAMI**

**ANÁLISE FRACTAL E MULTIFRACTAL APLICADAS AO ESTUDO DE  
DEPÓSITOS DE OURO OROGÊNICO EM GREENSTONE BELTS**

**CAMPINAS**

**2022**

GUSTAVO NEGRELLO BERGAMI

ANÁLISE FRACTAL E MULTIFRACTAL APLICADAS AO ESTUDO DE  
DEPÓSITOS DE OURO OROGÊNICO EM GREENSTONE BELTS

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA  
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM  
GEOCIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOLOGIA E  
RECURSOS NATURAIS

ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS ROBERTO DE SOUZA FILHO

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO  
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO  
ALUNO GUSTAVO NEGRELLO BERGAMI E  
ORIENTADA PELO PROF. DR. CARLOS  
ROBERTO DE SOUZA FILHO

CAMPINAS

2022

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca do Instituto de Geociências  
Marta dos Santos - CRB 8/5892

B452a Bergami, Gustavo Negrello, 1991-  
Análise fractal e multifractal aplicadas ao estudo de depósitos de ouro  
orogênico em greenstone belts / Gustavo Negrello Bergami. – Campinas, SP :  
[s.n.], 2022.

Orientador: Carlos Roberto de Souza Filho.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de  
Geociências.

1. Minas e recursos minerais. 2. Autossimilaridade. 3. Distribuição espacial.  
4. Minérios de ouro. I. Souza Filho, Carlos Roberto de, 1965-. II. Universidade  
Estadual de Campinas. Instituto de Geociências. III. Título.

Informações Complementares

**Título em outro idioma:** Fractal and multifractal analyses applied to the study of greenstone  
belt hosted orogenic gold deposits

**Palavras-chave em inglês:**

Mines and mineral resources

Self-similarity

Spatial distribution

Gold ores

**Área de concentração:** Geologia e Recursos Naturais

**Titulação:** Mestre em Geociências

**Banca examinadora:**

Carlos Roberto de Souza Filho [Orientador]

Gelvam André Hartmann

Jeferson de Souza

**Data de defesa:** 02-12-2022

**Programa de Pós-Graduação:** Geociências

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-7652-1828>

- Currículo Lattes do autor: <https://lattes.cnpq.br/6831719177416289>



**UNICAMP**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**AUTOR:** Gustavo Negrello Bergami

**ANÁLISE FRACTAL E MULTIFRACTAL APLICADAS AO ESTUDO DE  
DEPÓSITOS DE OURO OROGÊNICO EM GREENSTONE BELTS**

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho

Aprovado em: 02 / 12 / 2022

**EXAMINADORES:**

Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho - Presidente

Prof. Dr. Gelvam André Hartmann

Prof. Dr. Jeferson de Souza

*A Ata de Defesa assinada pelos membros da Comissão Examinadora consta no processo de vida acadêmica do aluno.*

Campinas, 02 de dezembro de 2022.

## SÚMULA CURRICULAR

Gustavo Negrello Bergami formou-se em Geologia pela Universidade Federal do Paraná no ano de 2013. Entre os anos de 2014 e 2020 atuou como pesquisador em Geociências pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM). Trabalhou com projetos de mapeamento geológico e prospecção mineral regionais nos Estados de Rondônia, Amazonas e Acre, dentre eles o projeto Metalogenia do Sudeste de Rondônia (2014), Áreas de Relevante Interesse Mineral Nova Brasilândia (2015-2018) e Novas Fronteiras Noroeste de Rondônia (2018-2020). Nestes projetos, teve atuação principalmente nas áreas de geologia estrutural, metalogenia em prospectos polimetálicos de Zn-Pb-Ag-Au, ouro, cobre, fosfato magmático, platinoides, dentre outros, além de geotectônica e litogeoquímica.

Desde 2020, atua na Agência Nacional de Mineração do Estado do Paraná (ANM-PR), na área de fiscalização da atividade mineral, e também em suporte à Superintendência de Fiscalização de Barragens de Mineração, com desenvolvimento, a partir de março de 2021, de especialização na área de engenharia de barragens pela PUC Minas com conclusão em junho de 2022.

O ingresso do autor no programa de pós-graduação da Universidade Estadual de Campinas se deu em março de 2020.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todas as pessoas e instituições que permitiram a realização deste trabalho através de sua contribuição direta ou indireta.

Ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas, pela estrutura oferecida e apoio administrativo.

Ao meu orientador Professor Dr. Carlos Roberto de Souza Filho pelo constante incentivo à excelência na pesquisa e valiosas sugestões para o aprimoramento do trabalho.

Ao Serviço Geológico do Brasil pela liberação de seis meses para cursar as disciplinas do mestrado e pelo apoio da Litoteca de Araraquara na confecção das lâminas petrográficas, especialmente nas pessoas dos geólogos Manoel da Costa e Fabrizio Caltabellotta, e também aos técnicos, que trabalharam de forma muito competente na preparação das amostras e das lâminas.

Ao chefe da Divisão de Geofísica do SGB, Luiz Gustavo Rodrigues, pela ajuda com os softwares de processamento de imagens geofísicas, e aos geofísicos da divisão, Isabelle Serafim e Vicente de Paula, pelo auxílio no processamento das imagens aerogeofísicas.

Ao grande amigo Elias Prado pelo fornecimento dos algoritmos de complexidade geológica, e auxílio com eventuais problemas.

Ao colega Paulo Haddad, um agradecimento especial pela ajuda durante todas as fases do trabalho com a metodologia desenvolvida no seu mestrado, que serviu de inspiração original para este trabalho.

À Priscila Oliveira pela ajuda com o software Intrepid e com o processamento das *worms* magnéticas.

Aos meus gerentes na Agência Nacional de Mineração, Renata Moro e Ronaldo Baeta, pela compreensão e tolerância no período da pesquisa.

À AngloGold Ashanti Córrego do Sítio pelo apoio no fornecimento de amostras de testemunhos de sondagem orientados, especialmente ao geólogo Marco Antônio Castoldi que providenciou a separação e o envio do material.

À minha esposa Maíra Hilgemberg Alves pelo amor incondicional, motivação e apoio ao trabalho.

## RESUMO

Desde a sua criação, há pouco mais de meio século, o conceito de geometria fractal tem sido utilizado com sucesso na área das ciências naturais por sua capacidade de caracterizar formas irregulares, incluindo elementos que compõem as principais feições geológicas. No caso dos depósitos minerais, as interações fluido-rocha, variações de composição e pH dos fluidos, estruturas geológicas, condições de pressão e temperatura e contrastes litológicos, são processos que atuam em conjunto desde a escala microscópica até vários quilômetros, e já tiveram sua característica fractal demonstrada em diversos trabalhos. Atualmente, há o entendimento de que as acumulações de minério se desenvolvem a partir de sistemas críticos, não-lineares, mantidos distantes do equilíbrio pelo influxo contínuo de calor e fluidos. Isso gera produtos com caráter multifractal que devem ser estudados com métodos apropriados para sua compreensão. Assim, nessa pesquisa, foram selecionadas quatro províncias de importância mundial com depósitos de ouro orogênico em *greenstone belts* - *Abitibi*, no Canadá, *Norseman-Wiluna*, na Austrália, Rio das Velhas, no Brasil, e *Central Lapland*, na Finlândia - para um estudo multiescalar com técnicas de análise fractal e multifractal. Foi analisada a presença de geometria fractal nas distribuições espaciais dos depósitos em escala regional. Considerando-se o significativo controle estrutural e estratigráfico deste tipo de mineralização, foi avaliada sua relação com lineamentos magnéticos, através dos resultados das análises fractais e multifractais. Para uma comparação entre as diferentes escalas de atuação dos processos mineralizantes, as mesmas técnicas foram aplicadas na escala local e microscópica, com análise da geometria da distribuição espacial de ocorrências e da forma dos grãos de minerais de minério. A área teste foi o Lineamento Córrego do Sítio e depósito homônimo, um dos principais do *greenstone belt* Rio das Velhas. A partir das análises fractais, observou-se em todas as províncias que as mineralizações possuem padrões de distribuição espacial distintos em escalas diferentes. A análise dos lineamentos magnéticos mostrou uma correlação entre os gradientes de variação de dimensões fractais e a tonelagem de ouro contida nos depósitos. Os resultados das análises multifractais apontam a existência de geometria multifractal que se estende desde a escala microscópica até a escala regional. O cálculo de índices multifractais mostrou uma relação direta dos lineamentos magnéticos com o *endowment* das províncias estudadas, além de diferenças entre tipos de mineralização em lâmina a partir das formas dos minerais. Os resultados obtidos demonstram a capacidade das técnicas utilizadas melhor caracterizarem os sistemas minerais estudados, e de servirem para a comparação entre sistemas similares em diferentes escalas e locais. A metodologia empregada pode ser utilizada para futuros estudos de outros sistemas minerais com controles geológicos similares.

*Palavras-chave:* Sistemas minerais; autossimilaridade; distribuição espacial; ouro orogênico; lineamentos magnéticos

## ABSTRACT

Since its creation just over half a century ago, the concept of fractal geometry has been successfully applied in the field of natural sciences for its ability to characterize irregular shapes, including the elements that make up the main geological features. In the case of mineral deposits, fluid-rock interactions, variations in fluid composition and pH, geological structures, pressure and temperature conditions and lithological contrasts, are processes that act together from the microscopic scale to several kilometers, and have already had their fractal characteristic demonstrated in several works. In addition, in recent years, there is an understanding that ore accumulations develop from critical, non-linear systems, kept away from equilibrium by the continuous influx of heat and fluids, and generate products with a multifractal character that must be studied with appropriate methods for their understanding. Thus, four world-class provinces with orogenic gold deposits in greenstone belts were selected, namely Abitibi, in Canada, Norseman-Wiluna, in Australia, Rio das Velhas, in Brazil, and Central Lapland, in Finland, for a multiscale study with fractal and multifractal analysis techniques. The presence of fractal geometry in the spatial distributions of the deposits on a regional scale was analyzed and considering the significant structural and stratigraphic control of this type of mineralization, its relationship with magnetic lineaments was evaluated through the results of fractal and multifractal analyses. For a comparison between the different scales of the mineralizing processes, the same techniques were applied at the local and microscopic scale, with analysis of the geometry of the spatial distribution of mineral occurrences and the shape of the mineral ore grains in the context of the Córrego do Sítio Lineament and the homonymous deposit, one of the main deposits of the Rio das Velhas greenstone belt. From fractal analyses, it was observed in all provinces that mineralizations have distinct spatial distribution patterns at different scales. The analysis of the magnetic lineaments showed a correlation between the gradients of variation of fractal dimensions and the tonnage of gold contained in the deposits. The results of the multifractal analyzes point to the existence of multifractal geometry that extends from the microscopic scale to the regional scale. The calculation of multifractal indices showed a direct relationship between the magnetic lineaments and the gold endowment of the studied provinces, as well as differences between types of mineralization in thin section based on the mineral shapes. The results obtained demonstrate the ability of the techniques to better characterize the mineral systems studied, and to serve for the comparison between similar systems at different scales and locations. The methodology employed can be used for future studies of other mineral systems with similar geological controls.

Key-words: Mineral systems; Self-similarity; Spatial distribution; Orogenic gold; Magnetic lineaments



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO E MATERIAIS E MÉTODOS

- Fig. 2.1.** Fluxograma das etapas desenvolvidas no trabalho em escala regional e local. Os depósitos e lineamentos magnéticos interpretados são analisados pela técnica do *box-counting*. São geradas as dimensões fractais de sua distribuição espacial, bem como os índices multifractais  $\Delta\alpha$  (variação de singularidade),  $\Delta f(\alpha)$  (variação de espectro multifractal) e  $\tau''(1)$  (índice de multifractalidade) para a distribuição dos lineamentos magnéticos. ....21
- Fig. 2.2.** Fluxo de trabalho com as lâminas de amostras de testemunhos de sondagem para coleta de dados e análise. Este procedimento foi repetido para as 30 fotomicrografias selecionadas. As lâminas foram confeccionadas com suas bordas na direção norte-sul (topo à esquerda). As fotomicrografias foram obtidas sob luz refletida. Um mapa binário com os minerais de minério foi confeccionado. A partir deste mapa, foram desenvolvidas análises fractais por *box-counting* e multifractais pelo método dos momentos. ....22
- Fig. 2.1.** Mapa geológico simplificado da área de estudo em *Abitibi*, com a localização dos alguns dos principais depósitos minerais. Mapa adaptado dos mapas dos serviços geológicos de *Québec* (MERN) e *Ontario* (*Geology Ontario*).....31
- Fig. 2.2.** Mapa geológico simplificado da área estudada, com alguns dos principais depósitos de ouro orogênico. Mapa confeccionado a partir da base de dados do *Geoscience Australia*. ....32
- Fig. 2.3.** Mapa com a geologia simplificada da área de estudo em *Central Lapland*, com a localização dos depósitos de ouro orogênico. Mapa gerado a partir da base de dados do Serviço Geológico da Finlândia (GTK).....33
- Fig. 2.4.** Mapas de localização com as áreas de estudo regional (A) e local, no Lineamento Córrego do Sítio (B), com os depósitos e ocorrências de ouro analisados no trabalho. Mapa regional feito a partir do mapa geológico do estado de Minas Gerais. Mapa local gerado a partir do mapa 1:50.000 do projeto ARIM Quadrilátero Ferrífero. Fonte: SGB/CPRM.....35
- Fig. 4.1.** Fluxograma com as etapas desenvolvidas nas escalas regional e local. Os depósitos e lineamentos magnéticos interpretados foram analisados pela técnica do *box-counting*. Nesta técnica, foram geradas as dimensões fractais de sua distribuição espacial, bem como os índices multifractais  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta f(\alpha)$  e  $\tau''(1)$  para a distribuição dos lineamentos magnéticos.....41
- Fig. 4.2.** Fluxo de trabalho com as lâminas de amostras de testemunhos de sondagem, para coleta de dados e análise. Este procedimento foi repetido para todas as 30 fotomicrografias. As lâminas foram confeccionadas com suas bordas na direção norte-sul (topo à esquerda). Fotomicrografias foram obtidas sob luz refletida e um mapa binário com os minerais de minério foi confeccionado. A partir deste mapa, foram desenvolvidas análises fractais por *box-counting* e multifractais pelo método dos momentos. ....42
- Fig. 5.1.** Resultados da análise fractal da distribuição dos depósitos nas quatro áreas de estudo, exibidos em gráficos log-log. As linhas de tendência azuis representam a escala local, as laranjas a escala distrital e as cinzas a escala regional. Ver texto e tabela para descrição dos detalhes. ....45
- Fig. 5.2.** Mapa de “worms” magnéticas na região do *greenstone belt* de *Abitibi* com a distribuição espacial dos depósitos estudados. Profundidades estimadas em metros. ....46

<b>Fig. 5.3.</b> Mapa de <i>worms</i> magnéticas da região do <i>greenstone belt Norseman-Wiluna</i> com a distribuição espacial dos depósitos estudados. Profundidades estimadas em metros.....	48
<b>Fig. 5.4.</b> Mapa de <i>worms</i> magnéticas da região do <i>greenstone belt Rio das Velhas</i> com a distribuição espacial dos depósitos estudados. Profundidades estimadas em metros.....	49
<b>Fig. 5.5.</b> Mapa de <i>worms</i> magnéticas da região do <i>greenstone belt de Central Lapland</i> com a distribuição espacial dos depósitos estudados. Profundidades estimadas em metros.....	50
<b>Fig. 5.6.</b> Mapa de contornos das dimensões fractais de todos os lineamentos magnéticos na área do <i>greenstone belt Abitibi</i> , calculadas a partir de grade de células de 5 km de largura. As cores quentes indicam maiores dimensões fractais (i.e. maior densidade de estruturas). Os círculos pretos indicam as localizações dos depósitos ouro orogênico, sendo os maiores correspondentes a minas ativas. As linhas verdes mostram a localização dos perfis nas principais zonas de cisalhamento auríferas com a relação entre as dimensões fractais e a quantidade de ouro. ....	51
<b>Fig. 5.7.</b> Mapa de contornos das dimensões fractais dos lineamentos magnéticos filtrados nas direções favoráveis WNW-ESE e NW-SE (referências na tabela 1) calculadas a partir de grade de células de 5 km de largura. As cores quentes indicam maiores dimensões fractais (i.e. maior densidade de estruturas). Os círculos pretos indicam as localizações dos depósitos ouro orogênico, sendo os maiores correspondentes a minas ativas. <i>Greenstone belt Abitibi</i> . ....	52
<b>Fig. 5.8.</b> Mapa de contornos das dimensões fractais das interseções de lineamentos magnéticos, calculadas a partir de grade de células de 20 km de largura. As cores quentes indicam maiores dimensões fractais (i.e. maior densidade de interseções). Os círculos pretos indicam as localizações dos depósitos ouro orogênico, sendo os maiores correspondentes a minas ativas. <i>Greenstone belt Abitibi</i> . ....	53
<b>Fig. 5.9.</b> Mapa de contornos das dimensões fractais de todos os lineamentos magnéticos na área do <i>greenstone belt Norseman-Wiluna</i> , calculadas a partir de grade de células de 5 km de largura. As cores quentes indicam maiores dimensões fractais (i.e. maior densidade de estruturas). Os círculos pretos indicam as localizações dos depósitos ouro orogênico, com tamanho proporcional à quantidade de ouro. As linhas verdes mostram a localização dos perfis nas principais zonas de cisalhamento auríferas com a relação entre as dimensões fractais e a quantidade de ouro. ....	54
<b>Fig. 5.10.</b> Mapa de contornos das dimensões fractais dos lineamentos magnéticos filtrados nas direções favoráveis NNW-SSE e NW-SE (de acordo com referências da tabela 1) calculadas a partir de grade de células de 5 km de largura. As cores quentes indicam maiores dimensões fractais (i.e. maior densidade de estruturas). Os círculos pretos indicam as localizações dos depósitos ouro orogênico, com tamanho proporcional à quantidade de ouro. <i>Greenstone belt Norseman-Wiluna</i> . ....	55
<b>Fig. 5.11.</b> Mapa de contornos das dimensões fractais das interseções de lineamentos magnéticos, calculadas a partir de grade de células de 20 km de largura. As cores quentes indicam maiores dimensões fractais (i.e. maior densidade de interseções). Os círculos pretos indicam as localizações dos depósitos ouro orogênico no <i>greenstone belt Norseman-Wiluna</i> . ....	56
<b>Fig. 5.12.</b> Mapa de contornos das dimensões fractais de todos os lineamentos magnéticos na área do <i>greenstone belt Rio das Velhas</i> , calculadas a partir de grade de células de 1 km de largura. As cores quentes indicam maiores dimensões fractais (i.e. maior densidade de estruturas). Os martelos cruzados para cima e para baixo simbolizam as minas ativas e inativas, respectivamente. As linhas verdes mostram a localização	

dos perfis nas principais zonas de cisalhamento auríferas com a relação entre as dimensões fractais e a quantidade de ouro. ....	57
<b>Fig. 5.13.</b> Mapa de contornos das dimensões fractais dos lineamentos filtrados nas direções NW-SE, NE-SW e N-S (conforme referências na tabela 1) no <i>greenstone belt</i> Rio das Velhas, calculadas a partir de grade de células de 1 km de largura. As cores quentes indicam maiores dimensões fractais (i.e. maior densidade de estruturas). Os martelos cruzados para cima e para baixo simbolizam as minas ativas e inativas, respectivamente. ....	58
<b>Fig. 5.14.</b> Mapa de contornos das dimensões fractais das interseções de lineamentos no GBRV, calculadas a partir de grade de células de 2 km de largura. As cores quentes indicam maiores dimensões fractais (i.e. maior densidade de interseções). Os martelos cruzados para cima e para baixo simbolizam as minas ativas e inativas, respectivamente. ....	59
<b>Fig. 5.15.</b> Mapa de contornos das dimensões fractais de todos os lineamentos magnéticos na área do <i>greenstone belt Central Lapland</i> , calculadas a partir de grade de células de 2,5 km de largura. As cores quentes indicam maiores dimensões fractais (i.e. maior densidade de estruturas). Os martelos cruzados para cima e para baixo simbolizam as minas ativas e inativas, respectivamente. As linhas verdes mostram a localização dos perfis nas principais zonas de cisalhamento auríferas com a relação entre as dimensões fractais e a quantidade de ouro. ....	59
<b>Fig. 5.16.</b> Mapa de contornos das dimensões fractais dos lineamentos filtrados nas direções favoráveis NNW-SSE, NNE-SSW, N-S e WNW-ESE (conforme referências na tabela 1) no <i>greenstone belt Central Lapland</i> , calculadas a partir de grade de células de 2,5 km de largura. As cores quentes indicam maiores dimensões fractais (i.e. maior densidade de estruturas). Os martelos cruzados para cima e para baixo simbolizam as minas ativas e inativas, respectivamente. ....	60
<b>Fig. 5.17.</b> Mapa de contornos das dimensões fractais das interseções de lineamentos no <i>greenstone belt Central Lapland</i> , calculadas a partir de grade de células de 5 km de largura. As cores quentes indicam maiores dimensões fractais (i.e. maior densidade de interseções). Os martelos cruzados para cima e para baixo simbolizam as minas ativas e inativas, respectivamente. ....	60
<b>Fig. 5.18.</b> Perfis demonstrando a relação entre a variação de dimensões fractais e a quantidade de ouro nas regiões das zonas de cisalhamento <i>Porcupine – Destor</i> (A) e <i>Larder Lake – Cadillac</i> (B), no <i>greenstone belt Abitibi</i> . Os perfis têm comprimento de ~150 km (A) e ~250 km (B). As toneladas de ouro foram obtidas a partir de Gosselin et al. (2005). ....	61
<b>Fig. 5.19.</b> Perfis exibindo a relação entre a variação de dimensões fractais e a quantidade de ouro nas regiões das zonas de cisalhamento <i>Laverton</i> (A) (~165 km) e <i>Bardoc – Boulder - Lefroy</i> (B) (~195 km), no <i>greenstone belt Norseman- Wiluna</i> . As toneladas de ouro de cada depósito correspondem à soma dos recursos da base de dados do <i>Geoscience Australia</i> . ....	62
<b>Fig. 5.20.</b> Perfis demonstrando a relação entre a variação de dimensões fractais e a quantidade de ouro nas regiões das zonas de cisalhamento <i>Paciência</i> (A e B) e <i>Córrego do Sítio</i> (C), no <i>greenstone belt Rio das Velhas</i> . Os perfis têm comprimento de ~23,5 km (A), ~8,5 km (B) e ~ 8 km (C). As quantidades de ouro foram obtidas a partir da base dados do Serviço Geológico do Brasil. ....	62

<b>Fig. 5.21.</b> Perfis com a relação entre a variação de dimensões fractais e a quantidade de ouro nas regiões das zonas de cisalhamento <i>Kiistala</i> (A) (~43 km) e <i>Sirkka</i> (B) (~110 km), no <i>greenstone belt Central Lapland</i> . As quantidades de ouro foram retiradas de Niiranen et al. (2015). .....	63
<b>Fig. 5.22.</b> Gráficos com os índices obtidos a partir da análise multifractal dos lineamentos magnéticos da área do GBRV. (a) Expoente de massa $\tau(q)$ obtido através da inclinação das linhas do gráfico das funções de partição ( $x_q(\epsilon)$ vs. $q$ ). (b) Singularidade ( $\alpha$ ) calculada a partir de (A). (c) Espectro multifractal $f(\alpha)$ calculado a partir de $\tau(q)$ , $\alpha(q)$ , e $q$ . (d) Espectro multifractal $f(\alpha)$ vs singularidade $\alpha$ , que apresenta uma função convexa inclinada à esquerda. ....	64
<b>Fig. 5.23.</b> Gráficos com o resumo dos índices $\Delta\alpha$ e $\tau''(1)$ do conjunto de mapas de lineamentos. Discussões sobre os resultados podem ser encontradas no texto. ....	65
<b>Fig. 6.1.</b> Diagramas estruturais das principais estruturas relacionadas às mineralizações auríferas. A maioria corpos de minério no <i>greenstone belt</i> Rio das Velhas são posicionados ao longo das lineações de estiramento (Baltazar and Zucchetti, 2007; Lobato et al., 2001). ....	65
<b>Fig. 6.2.</b> Diagrama log-log com o resultado da análise por <i>box-counting</i> das ocorrências no Lineamento Córrego do Sítio .....	66
<b>Fig. 6.3.</b> Mapa com os lineamentos magnéticos e ocorrências de ouro analisados na área de estudo e a localização das sondagens amostradas para petrografia .....	67
<b>Fig. 7.1.</b> A) <i>Box-plot</i> dos valores de $R^2$ obtidos a partir das regressões lineares das análises fractais por <i>box-counting</i> ; B) <i>Box-plots</i> das dimensões fractais das formas dos grãos de sulfetos, para todas as amostras, e separados por tipo de mineralização.....	68
<b>Fig. 7.2.</b> <i>Box-plots</i> com os índices multifractais $\tau''(1)$ (índice de multifractalidade), $\Delta\alpha$ (variação de singularidade) e $\Delta f(\alpha)$ (variação de espectro multifractal) calculados para as formas dos grãos de sulfeto .....	69

#### APÊNDICE A - EMBASAMENTO TEÓRICO

<b>Fig. 1.1.</b> Processo iterativo realizado na análise por <i>box-counting</i> . A aresta das caixas ( $\delta$ ) é progressivamente diminuída, e o número de caixas que contém feições ( $n(\delta)$ ) é contado até que haja uma caixa por feição, aproximadamente. Estas duas variáveis são confrontadas em um gráfico log-log, cuja inclinação fornece o valor da dimensão fractal. Fonte: Carranza (2009).....	82
---	----

#### APÊNDICE B - BASES DE DADOS ANALISADAS

<b>Fig. 1.1.</b> Mapa de lineamentos magnéticos da área do <i>greenstone belt Abitibi</i> , sem a aplicação de filtros.....	85
<b>Fig. 1.2.</b> Mapa de lineamentos magnéticos da área do <i>greenstone belt Abitibi</i> , com a aplicação de filtros nas direções WNW-ESE e NW-SE (referências na tabela 1).....	85
<b>Fig. 1.3.</b> Mapa dos pontos de interseção entre todos os lineamentos magnéticos interpretados para a região do <i>greenstone belt Abitibi</i> .....	86
<b>Fig. 1.4.</b> Mapa de lineamentos magnéticos da área do <i>greentone belt Norseman-Wiluna</i> , sem a aplicação de filtros direcionais.....	87

<b>Fig. 1.5.</b> Mapa de lineamentos magnéticos da área do <i>greenstone belt Norseman-Wiluna</i> , com a aplicação de filtros nas direções NNW-SSE e NW-SE (referências na tabela 1).....	88
<b>Fig. 1.6.</b> Mapa dos pontos de interseção entre todos os lineamentos magnéticos interpretados para a região do <i>greenstone belt Abitibi</i> .....	89
<b>Fig. 1.7.</b> Mapa de lineamentos magnéticos da área do <i>greenstone belt</i> Rio das Velhas, sem a aplicação de filtros direcionais.....	90
<b>Fig. 1.8.</b> Mapa de lineamentos magnéticos da área do <i>greenstone belt</i> Rio das Velhas, com a aplicação de filtros nas direções NW-SE, NE-SW e N-S (referências na tabela 1).....	90
<b>Fig. 1.9.</b> Mapa dos pontos de interseção entre todos os lineamentos magnéticos interpretados para a região do <i>greenstone belt</i> Rio das Velhas.....	91
<b>Fig. 1.10.</b> Mapa de lineamentos magnéticos da área do <i>greenstone belt Central Lapland</i> , sem a aplicação de filtros direcionais.....	91
<b>Fig. 1.11.</b> Mapa de lineamentos magnéticos da área do <i>greenstone belt Central Lapland</i> , com a aplicação de filtros nas direções NNW-SSE, NNE-SSW, N-S e WNW-ESE (referências na tabela 1).....	92
<b>Fig. 1.12.</b> Mapa dos pontos de interseção entre todos os lineamentos magnéticos interpretados para a região do <i>greenstone belt Central Lapland</i> .....	92
<b>Fig. 2.1.</b> Mapas binários dos minerais de minério de todas as 30 fotomicrografias orientadas obtidas nas amostras de testemunhos de sondagens mineralizadas. Os mapas foram desenvolvidos a partir da digitalização dos minerais relacionados à mineralização: pirita e arsenopirita limpa e porosa, pirrotita e ouro livre (Júnior et al. 2015; Porto 2008).....	93
<b>Fig. 3.1.</b> <i>Box-plots</i> dos valores de $R^2$ obtidos a partir das regressões lineares das análises fractais por <i>box-counting</i> .....	94
<b>Fig. 3.2.</b> <i>Box-plots</i> das dimensões fractais dos centroides dos grãos de sulfetos. (A) Todas as amostras; (B) Amostras separadas por tipo de mineralização.....	95
<b>Fig. 4.1.</b> Espectro multifractal $f(\alpha)$ dos lineamentos magnéticos das quatro áreas de estudo.....	96
<b>Fig. 4.2.</b> Espectro multifractal $f(\alpha)$ dos lineamentos magnéticos filtrados das quatro áreas de estudo.....	97

## LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2 - O CARÁTER MULTIFRACTAL DOS PRINCIPAIS SISTEMAS DE OURO OROGÊNICO EM GREENSTONE BELTS NO MUNDO: ABORDAGEM MULTIESCALA E ESTUDO DE CASO NO DEPÓSITO CÓRREGO DO SÍTIO, GREENSTONE BELT RIO DAS VELHAS, BRASIL

<b>Tabela 1.</b> Idades e principais macro-estruturas relacionadas às mineralizações, e suas respectivas direções predominantes.....	35
<b>Tabela 2.</b> Características dos aerolevantamentos utilizados. Informações obtidas junto aos fornecedores dos dados.....	38
<b>Tabela 3.</b> Resumo das dimensões fractais e pontos de quebra entre diferentes valores obtidos a partir das análises.....	44
<b>Tabela 4.</b> Variação dos índices multifractais para cada área, para todos os lineamentos e para os lineamentos filtrados nas direções favoráveis.....	63
<b>Tabela 5.</b> Resumo das dimensões fractais obtidas em todos os mapas binários de minerais de minério.....	67
<b>Tabela 6.</b> Valores dos índices multifractais $\Delta\alpha$ (variação de singularidade), $\tau''(1)$ (índice de multifractalidade) e $\Delta f(\alpha)$ (variação de espectro multifractal) calculados para as formas dos grãos dos minerais de minério.....	68

### APÊNDICE B - BASES DE DADOS ANALISADAS

<b>Tabela 1.</b> Idades e principais macro-estruturas relacionadas às mineralizações, e suas respectivas direções predominantes.....	84
<b>Tabela 2.</b> Resumo das dimensões fractais obtidas para os centroides dos minerais de minério em todas as imagens.....	95

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	INTRODUÇÃO .....	18
1.	CONTEXTUALIZAÇÃO, OBJETIVOS E PRINCIPAIS RESULTADOS DA PESQUISA .....	18
2.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	20
3.	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES .....	23
CAPÍTULO 2	O CARÁTER MULTIFRACTAL DOS PRINCIPAIS SISTEMAS DE OURO OROGÊNICO EM GREENSTONE BELTS NO MUNDO: ABORDAGEM MULTIESCALA E ESTUDO DE CASO NO DEPÓSITO CÓRREGO DO SÍTIO, GREENSTONE BELT RIO DAS VELHAS, BRASIL .....	27
1.	INTRODUÇÃO .....	28
2.	GEOLOGIA DAS ÁREAS ESTUDADAS .....	30
2.1.	ABITIBI, PROVÍNCIA SUPERIOR, CANADÁ .....	30
2.2.	NORSEMAN-WILUNA, CRÁTON YILGARN, AUSTRÁLIA .....	31
2.3.	CENTRAL LAPLAND, FINLÂNDIA .....	33
2.4.	RIO DAS VELHAS, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, BRASIL .....	34
2.5.	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS MINERAIS ESTUDADOS .....	35
2.6.	GEOLOGIA DO LINEAMENTO CÓRREGO DO SÍTIO .....	36
2.7.	MINERALIZAÇÃO DO LINEAMENTO CÓRREGO DO SÍTIO .....	37
3.	BASES DE DADOS .....	38
3.1.	DADOS EM ESCALA REGIONAL .....	38
3.1.1.	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS DEPÓSITOS DE OURO OROGÊNICO .....	38
3.1.2.	AEROMAGNETOMETRIA .....	38
3.1.3.	DADOS DO LINEAMENTO CÓRREGO DO SÍTIO .....	39
3.1.4.	DADOS NA ESCALA MICROSCÓPICA .....	39
4.	MÉTODOS .....	39
4.1.	ANÁLISE FRACTAL .....	39
4.2.	ANÁLISE MULTIFRACTAL .....	43
5.	RESULTADOS EM ESCALA REGIONAL .....	44
5.1.	ANÁLISE FRACTAL DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS DEPÓSITOS .....	44
5.2.	MAPAS DE “WORMS” MAGNÉTICAS .....	46
5.2.1.	GREENSTONE BELT ABITIBI .....	46
5.2.2.	GREENSTONE BELT NORSEMAN-WILUNA .....	47
5.2.3.	GREENSTONE BELT RIO DAS VELHAS .....	49
5.2.4.	GREENSTONE BELT CENTRAL LAPLAND .....	49
5.3.	MAPAS DE DIMENSÕES FRACTAIS DE LINEAMENTOS MAGNÉTICOS .....	50
5.3.1.	GREENSTONE BELT ABITIBI .....	50
5.3.2.	GREENSTONE BELT NORSEMAN-WILUNA .....	53

5.3.3.	GREENSTONE BELT RIO DAS VELHAS .....	57
5.3.4.	GREENSTONE BELT CENTRAL LAPLAND .....	59
5.4.	PERFIS DE DIMENSÕES FRACTAIS E QUANTIDADE DE OURO .....	61
5.5.	RESULTADOS DA ANÁLISE MULTIFRACTAL EM ESCALA REGIONAL.....	63
5.6.	RESULTADOS EM ESCALA LOCAL: ESTUDO DO LINEAMENTO CÓRREGO DO SÍTIO	65
6.	ANÁLISE ESTRUTURAL .....	65
6.1.	ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS DEPÓSITOS .....	66
6.2.	ANÁLISE MULTIFRACTAL EM ESCALA LOCAL .....	66
7.	RESULTADOS EM MICROESCALA .....	67
7.1.	ANÁLISE FRACTAL DAS FORMAS DOS GRÃOS DE SULFETOS .....	67
7.2.	ANÁLISE MULTIFRACTAL DAS FORMAS DOS GRÃOS DE SULFETOS .....	68
8.	DISCUSSÃO .....	69
8.1.	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS DEPÓSITOS EM ESCALA REGIONAL .....	69
8.2.	MAPAS DE DIMENSÕES FRACTAIS DE LINEAMENTOS MAGNÉTICOS .....	70
8.3.	ANÁLISE NA ESCALA DO LINEAMENTO CÓRREGO DO SÍTIO.....	71
8.4.	ANÁLISE NA ESCALA DE LÂMINA .....	71
8.5.	O CARÁTER MULTIFRACTAL DAS MINERALIZAÇÕES DE OURO OROGÊNICO.....	72
9.	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA MINERALIZAÇÃO EM DIFERENTES ESCALAS .....	72
9.1.	LINEAMENTOS MAGNÉTICOS .....	73
9.2.	FORMAS DOS MINERAIS .....	73
10.	CONCLUSÕES .....	74
	APÊNDICE A - EMBASAMENTO TEÓRICO .....	83
	APÊNDICE B - BASES DE DADOS ANALISADAS.....	85
CAPÍTULO 3	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	101



Considerando as opções para a apresentação de dissertações indicadas pelo programa de Pós-graduação em Geociências da Universidade Estadual de Campinas, optou-se pelo formato de artigos. Assim, a dissertação está organizada da seguinte maneira: no capítulo 1 é apresentada uma introdução com o contexto geral da pesquisa, os objetivos de sua realização, bem como as principais etapas de seu desenvolvimento. Nesse capítulo, a estrutura da dissertação é apresentada em detalhes. No capítulo 2, o assunto abordado é apresentado no formato de artigo, seguindo a sequência em que são discutidos na introdução geral. No capítulo 3, são apresentadas as conclusões gerais do trabalho.

## CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

### 1. CONTEXTUALIZAÇÃO, OBJETIVOS E PRINCIPAIS RESULTADOS DA PESQUISA

A descoberta de novos depósitos minerais, em um contexto em que grande parte dos recursos de “fácil acesso” já foi encontrada, demanda, além de grandes investimentos, abordagens inovadoras que possam fornecer informações até então desconhecidas sobre a forma de ocorrência destas acumulações anômalas de minerais econômicos. Normalmente, a prospecção mineral, através da modelagem preditiva de potencial mineral, utiliza o conhecimento empírico das associações entre as mineralizações e objetos ou feições geológicas (estruturas, contatos geológicos) e os processos formadores dos depósitos (Lisitsin, 2015). Porém, podem ocorrer erros consideráveis nestes modelos prospectivos devido às limitações no conhecimento destes processos e relações, já que processos metalogenéticos importantes podem ter passado despercebidos. O uso de técnicas tradicionais como inclusões fluidas, petrografia, análise estrutural, entre outras, pode ignorar processos de escala regional, por exemplo.

Nos últimos anos, surgiu um entendimento de que os depósitos minerais, no momento de sua formação, atuam como reatores químicos de fluxo aberto, em desequilíbrio através de toda sua evolução, e exibem comportamento não-linear, causado principalmente pela constante adição de calor e fluidos (Lester et al., 2012; Munro et al., 2018; Ord et al., 2012), sendo assim estudados a partir do conceito dos sistemas complexos (Ladyman et al., 2013). Nestes sistemas, a interação dos diversos processos que atuaram no momento de sua formação como as interações fluido-rocha, variações de composição e pH dos fluidos, estruturas de micro a macroescala, condições de pressão e temperatura, e as variações de litotipos, determinam sua distribuição espacial (Vearncombe and Zelic, 2015). As interações não-lineares destes múltiplos processos durante sua formação, como característica essencial deste tipo de sistema, tendem a formação de padrões espaciais ordenados em diversas escalas (Chainais, 2006; Sornette, 2004), com uma repetição de padrões não idênticos, mas similares (Mandelbrot, 1983; Turcotte, 1989). A autossimilaridade em múltiplas escalas é o que permite considerar tais padrões como fractais. Na análise fractal, o padrão de distribuição dos componentes é quantificado por um expoente denominado dimensão fractal. Por serem fenômenos naturais, os sistemas minerais apresentam irregularidades que geram elementos com dimensões fractais distintas e, portanto, sua combinação gera padrões multifractais (Cheng, 1999). Esta característica já foi constatada em diversos estudos com o uso de diferentes técnicas de análise (Hobbs and Ord, 2018; Munro et al., 2018; Ni et al., 2017; Ord et al., 2016). Para validar a hipótese de que sistemas minerais hidrotermais apresentam caráter multifractal, uma abordagem multiescala foi aqui desenvolvida. Alguns dos padrões espaciais relacionados à mineralizações de ouro orogênico (Groves et al., 1998) foram analisados. Esse tipo de mineralização compreende um típico sistema hidrotermal, com forte controle estrutural. Em escala regional e de distrito, sua distribuição espacial coincide com estruturas e contatos litológicos, que podem ser mapeados na forma de lineamentos magnéticos. Em escala microscópica (lâmina delgada), os sulfetos são distribuídos espacialmente em veios e zonas de alteração com mineralização disseminada, com análise destes padrões em busca de uma geometria multifractal. O estudo da distribuição espacial de depósitos minerais e de feições lineares (i.e., lineamentos estruturais e contatos litológicos), especificamente com técnicas de análise fractal, já demonstrou capacidade de fornecer informações sobre a atuação de processos distintos em diferentes escalas, ou a relação entre discontinuidades e a ocorrência de depósitos em escala regional (Carlson 1991; Carranza 2009; Haddad-Martim

et al. 2017; Hodkiewicz et al. 2005; Kruhl 2013; Raines 2008), e em escala microscópica, no estudo da distribuição espacial de minerais de minério (Haddad-Martim et al., 2018).

A distribuição de minerais de minério em microescala, em depósitos tipo IOCG (iron oxide copper-gold), já foi relacionada com a configuração dos próprios depósitos em escala regional, e com corpos de minério em escala de depósito (Carranza et al., 2019; Haddad-Martim et al., 2018). Nestes trabalhos, a extração de informações foi feita a partir da obtenção de fotomicrografias orientadas dos sulfetos em lâminas delgadas de amostras de corpos de minério. Fotomicrografias são representações bidimensionais da distribuição espacial dos minerais em microescala. Para verificar a presença de uma organização multifractal neste tipo de dado, é possível utilizar o método dos momentos (Halsey et al., 1987). Sua aplicação é bastante prática e já provou ser eficiente na análise de minerais em lâmina (Xie et al., 2010). Consiste basicamente na análise das feições de interesse, com a passagem de uma grade de tamanho cada vez menor, com quantificação e definição de sua autossimilaridade nas diferentes escalas. Fornece características como espectro multifractal e variação de singularidade do padrão analisado. Depósitos de ouro orogênico exibem característica de autossimilaridade em diferentes escalas (Kreuzer et al., 2007), ou seja, possuem geometria e processos que atuam de forma similar desde a escala microscópica até a escala regional, e apresentam caráter multifractal (Hobbs and Ord, 2018).

Em que pese os avanços supracitados, estudos combinando análise fractal e multifractal em diferentes escalas, tanto da análise de distribuição espacial dos depósitos e minerais de minério, quanto das estruturas geológicas associadas, são mais raros na literatura. Da mesma forma, inexistem trabalhos que comparam diferentes províncias minerais, com sistemas minerais semelhantes, a partir desses métodos. Buscando suprir essas lacunas, foram selecionadas para esse estudo quatro províncias mundiais de ouro orogênico em *greenstone belt* em estágio maduro de exploração: *Abitibi*, no Canadá, *Norseman-Wiluna*, na Austrália, Rio das Velhas, no Brasil e *Central Lapland*, na Finlândia. São regiões que possuem exemplos clássicos deste tipo de mineralização, e contam com grande quantidade de depósitos, além de disponibilidade de bases de dados confiáveis. Para as escalas local e microscópica, foi escolhida a região do Lineamento Córrego do Sítio, inserido no *greenstone belt* Rio das Velhas. O depósito Córrego do Sítio foi escolhido por ser uma das principais mineralizações de ouro orogênico no *greenstone belt* Rio das Velhas, além de apresentar claro controle estrutural (Júnior et al., 2015) e integrar um lineamento aurífero homônimo, com expressão regional. Além disso, o depósito apresenta disponibilidade de amostras de testemunhos de sondagem orientados.

O trabalho foi desenvolvido em duas etapas. Primeiramente, foi realizada uma análise comparativa entre as quatro províncias em escala regional, com técnicas de análise fractal e multifractal. Foram estudados produtos gerados a partir de dados de livre acesso, como lineamentos e *worms* de imagens de aeromagnetometria, além de bancos de dados com a localização e características básicas dos depósitos e ocorrências de ouro orogênico de cada local. O estudo das imagens aeromagnetométricas foi desenvolvido com a intenção de detectar e analisar a disposição de descontinuidades geológicas nas quatro áreas e sua relação com os depósitos de ouro em escala regional. Índices multifractais  $\Delta\alpha$  (variação de singularidade),  $\tau''(1)$  (índice de multifractalidade) e  $\Delta f(\alpha)$  (variação de espectro multifractal) (Zhao et al., 2011) também foram utilizados para caracterizar a distribuição espacial dos lineamentos magnéticos. Ao fim, foram avaliadas as similaridades e diferenças entre as províncias minerais, bem como a validade dos métodos para o estudo de outras regiões mineralizadas. Na segunda etapa, foi desenvolvido um estudo de caso na mineralização de ouro orogênico do depósito Córrego do Sítio, no *greenstone* Rio das Velhas, Brasil, para verificar o caráter multifractal da mineralização em escala de distrito e microscópica. Foi estudada a

distribuição espacial das ocorrências e lineamentos magnéticos, bem como confeccionadas fotomicrografias orientadas a partir de lâminas petrográficas feitas sobre amostras de testemunhos de sondagem, processadas e submetidas às mesmas análises desenvolvidas na escala regional, para fins de comparação. Além de verificar a existência de distribuição multifractal nos grãos de sulfetos, esta etapa do estudo teve como objetivo avaliar a capacidade de comparação entre diferentes tipos de mineralização (disseminada e venular), através dos índices multifractais  $\Delta\alpha$ ,  $\tau''(1)$  e  $\Delta f(\alpha)$ .

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

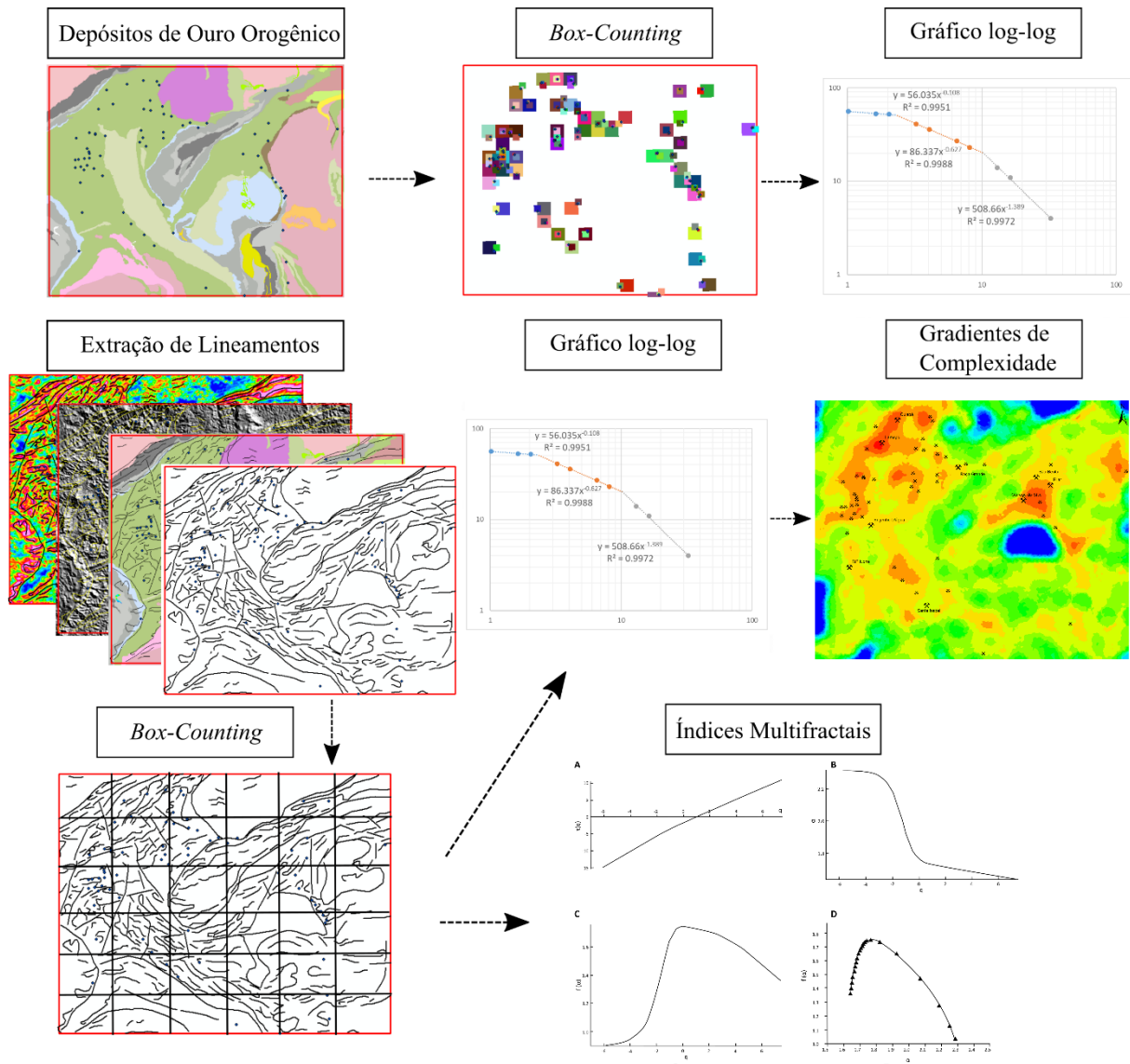
Aqui será apresentada uma explicação sucinta dos materiais e métodos utilizados na pesquisa, considerando que há uma apresentação mais detalhada dos mesmos no manuscrito e material suplementar do artigo científico no próximo capítulo.

Para a primeira etapa do trabalho - o estudo em escala regional - foram utilizadas bases de dados com informações de localização e dados sobre os depósitos de cada área de estudo, além de dados aeromagnetométricos obtidos a partir dos serviços geológicos de cada país. Os depósitos de ouro orogênico das quatro áreas de estudo tiveram sua distribuição espacial analisada através do método fractal *box-counting*. Também foi empregada a técnica do *box-counting* para análise dos mapas de lineamentos. Após o cálculo da dimensão fractal de cada célula, foi gerada uma grade com os valores das dimensões fractais. Estes valores foram então interpolados. O resultado indica a variabilidade na distribuição de estruturas e contatos geológicos interpretados na forma de lineamentos magnéticos. O estudo dos dados aeromagnetométricos foi desenvolvido com a intenção de detectar e analisar a disposição de descontinuidades geológicas nas quatro áreas e sua relação com os depósitos de ouro em escala regional (Fig. 2.1).

Na análise multifractal, foi empregado o método dos momentos (Halsey et al. 1987). A partir dos resultados, são calculados três índices relacionados às distribuições estudadas:  $\Delta\alpha$  (variação de singularidade),  $\tau''(1)$  (índice de multifractalidade) e  $\Delta f(\alpha)$  (variação de espectro multifractal). Estes índices fornecem informações sobre aspectos geométricos das feições foram utilizados pela primeira vez no trabalho de Zhao et al. (2011). O parâmetro  $\tau''(1)$  apresenta relação direta com a quantidade de feições e seu grau de irregularidade espacial. Indica que a distribuição tem caráter multifractal quando apresenta valores menores que zero. O parâmetro  $\Delta\alpha$ , denominado variação de singularidade, é definido como  $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ , no qual  $\alpha_{\max}(Q_{\min})$  e  $\alpha_{\min}(Q_{\max})$  representam os maiores e menores valores de  $\alpha$ , respectivamente. Caracteriza a multifractalidade da distribuição das feições analisadas. Seu valor é diretamente proporcional ao grau de irregularidade e complexidade das distribuições de cada local. Apresenta relação direta com as dimensões dos corpos de minério (Zhao et al. 2011). O parâmetro  $\Delta f(\alpha)$  (variação de espectro multifractal) indica a predominância de valores maiores ou menores nos dados. No caso das imagens de lineamentos, tem relação com o predomínio de regiões com ou sem lineamentos. Define se as feições ocorrem mais agrupadas ou dispersas no espaço.

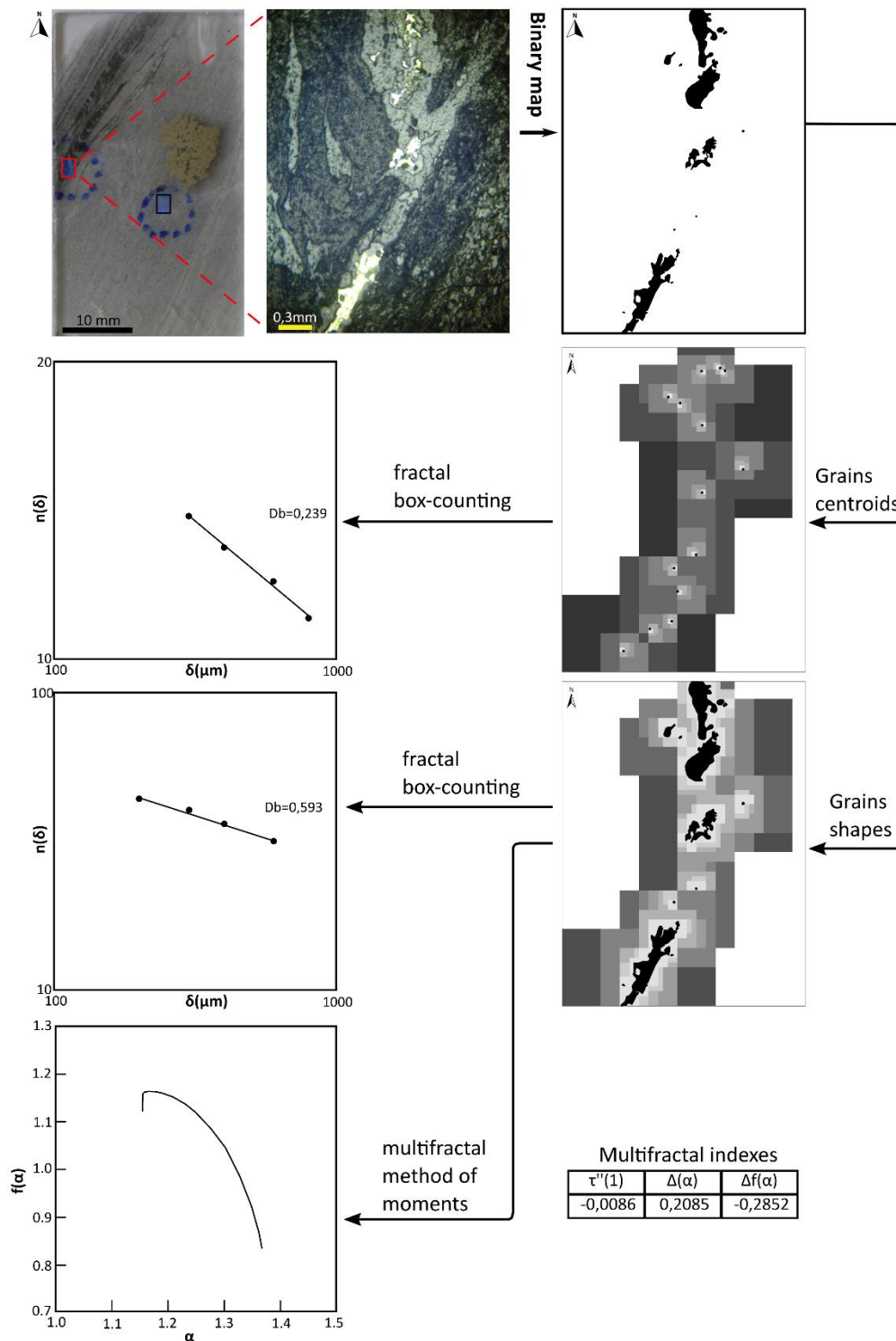
O estudo em escala local foi desenvolvido com os depósitos e ocorrências na região do lineamento Córrego do Sítio (*greenstone belt* Rio das Velhas), compilados a partir da literatura juntamente com o banco de dados regional. Além disto, foi utilizado um banco de dados de medidas estruturais compilado a partir de levantamentos de furos de sondagem orientados, gentilmente fornecidos pela empresa AngloGold Ashanti Córrego do Sítio. Também foram analisados os lineamentos magnéticos interpretados a partir de produtos gerados a partir dos dados aeromagnetométricos. Com base nesse conjunto de dados, foi desenvolvida uma análise fractal da

distribuição espacial dos depósitos e ocorrências relacionados aos lineamentos. Adicionalmente, foram feitas análises multifractais destes lineamentos para verificar a existência de padrões multifractais nesta escala.



**Fig. 2.1.** Fluxograma das etapas desenvolvidas no trabalho em escala regional e local. Os depósitos e lineamentos magnéticos interpretados são analisados pela técnica do *box-counting*. São geradas as dimensões fractais de sua distribuição espacial, bem como os índices multifractais  $\Delta\alpha$  (variação de singularidade),  $\Delta f(\alpha)$  (variação de espectro multifractal) e  $\tau''(1)$  (índice de multifractalidade) para a distribuição dos lineamentos magnéticos.

O estudo em escala microscópica foi desenvolvido a partir análise de 30 fotomicrografias orientadas e georreferenciadas (Fig. 2.2), obtidas de 15 lâminas petrográficas polidas, confeccionadas sobre 12 amostras mineralizadas de testemunhos de sondagem orientados do Alvo Mutuca, localizado a sudeste do corpo mineralizado Cristina, cedidas pela empresa AngloGold Ashanti.



**Fig. 2.2.** Fluxo de trabalho com as lâminas de amostras de testemunhos de sondagem para coleta de dados e análise. Este procedimento foi repetido para as 30 fotomicrografias selecionadas. As lâminas foram confeccionadas com suas bordas na direção norte-sul (topo à esquerda). As fotomicrografias foram obtidas sob luz refletida. Um mapa binário com os minerais de minério foi confeccionado. A partir deste mapa, foram desenvolvidas análises fractais por *box-counting* e multifractais pelo método dos momentos.

Na média, foram obtidas duas fotomicrografias em cada lâmina, variando de uma a três imagens, a depender da disponibilidade de grãos de sulfetos apropriados para a análise. As imagens foram obtidas

preferencialmente afastadas ortogonalmente entre si em relação à foliação principal, visando amostrar uma maior variedade de estilos de mineralização. Os métodos de análise utilizados se baseiam em duas propriedades geométricas dos minerais de minério: (i) sua distribuição espacial, representada através dos seus centroides, e (ii) suas formas, registradas na forma dos mapas binários. Tanto os centroides como as formas dos grãos foram analisados por *box-counting*. As formas também foram inspecionadas através do método multifractal dos momentos.

### 3. PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

O desenvolvimento do trabalho e os resultados obtidos serão apresentados no capítulo 2, na forma de um artigo científico.

Dentre os resultados obtidos na escala regional, destacam-se: (i) a definição de geometria fractal na distribuição espacial dos depósitos em escala regional e sua relação com regiões de altos valores de dimensões fractais (ou regiões de contraste entre valores altos e baixos) nos mapas de lineamentos em todas as províncias estudadas; (ii) a obtenção das dimensões fractais das distribuições espaciais dos depósitos e pontos de quebra entre diferentes valores de dimensão fractal, e comparação entre as diferentes regiões de estudo; (iii) demonstração do caráter multifractal das distribuições espaciais dos lineamentos magnéticos de todas as províncias; (iv) cálculo dos respectivos índices multifractais, com a comparação dos resultados para todas as províncias, além constatação da relação entre os índices multifractais e a quantidade de minério existente em cada província.

Na escala local, no Lineamento Córrego do Sítio, foi possível definir o aspecto fractal da distribuição espacial dos depósitos e ocorrências a partir do cálculo de sua dimensão fractal, que indicou o caráter predominantemente retilíneo da distribuição espacial destas ocorrências, causado por seu forte controle estrutural em relação às zonas de cisalhamento com o mesmo aspecto retilíneo. Também foi constatado o caráter multifractal da distribuição espacial dos lineamentos nesta escala, e calculados os mesmos índices para comparação com a escala regional. Na escala microscópica, nas lâminas delgadas de amostras de testemunhos de sondagem no depósito Córrego do Sítio, foi caracterizada a geometria fractal na distribuição espacial dos sulfetos, com cálculo de suas dimensões fractais. A geometria multifractal também foi verificada nas formas dos grãos de sulfetos em lâmina, com cálculo de seus índices multifractais.

A comparação dos resultados obtidos em multiescalas tem implicações no conhecimento do sistema mineral estudado. O caráter fractal da distribuição espacial dos depósitos, ocorrências e minerais de minério implica que controles definidos em diferentes escalas pode ser extrapolado de maneira confiável entre elas. Dessa forma o estudo de áreas pouco exploradas, com poucos depósitos conhecidos é facilitado. O cálculo dos índices multifractais dos lineamentos magnéticos permite uma comparação quantitativa entre diferentes escalas. Por exemplo, foi possível constatar que a região do Lineamento Córrego do Sítio possui elevado potencial dentro do *greenstone belt* Rio das Velhas por apresentar variação de singularidade ( $\Delta\alpha$ ) mais elevada e  $\tau''(1)$  mais negativo, ambos relacionados à um maior potencial mineral.

As conclusões e considerações finais da pesquisa estão ilustradas no capítulo 3.

### REFERÊNCIAS

- Carlson, C. A., 1991. Spatial distribution of ore deposits. *Geology*, 19(2), 111–114. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0111:SDOOD>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0111:SDOOD>2.3.CO;2)
- Carranza, E. J. M., 2009. Controls on mineral deposit occurrence inferred from analysis of their spatial pattern and spatial association with geological features. *Ore Geology Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2009.01.001>
- Carranza, E. J. M., de Souza Filho, C. R., Haddad-Martim, P. M., Nagayoshi, K., & Shimizu, I., 2019. Macro-scale ore-controlling faults revealed by micro-geochemical anomalies. *Scientific Reports*, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41019-1>
- Chainais, P., 2006. Multidimensional infinitely divisible cascades : Application to the modelling of intermittency in turbulence. *European Physical Journal B*, 51(2), 229–243. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2006-00213-y>
- Cheng, Q., 1999. Multifractality and spatial statistics, 25, 949–961.
- Groves, D. I., Goldfarb, R. J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S. G., & Robert, F., 1998. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, 13(1–5), 7–27. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(97\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(97)00012-7)
- Haddad-Martim, P. M., Carranza, E. J. M., & De Souza Filho, C. R., 2018. The fractal nature of structural controls on ore formation: The Case of the Iron oxide copper-gold deposits in the carajás mineral province, Brazilian amazon. *Economic Geology*, 113(7), 1499–1524. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4600>
- Halsey, T. C., Jensen, M. H., Kadanoff, L. P., Procaccia, I., & Shraiman, B. I., 1987. Fractal measures and their singularities: The characterization of strange sets. *Nuclear Physics B (Proceedings Supplements)*, 2(C), 501–511. [https://doi.org/10.1016/0920-5632\(87\)90036-3](https://doi.org/10.1016/0920-5632(87)90036-3)
- Hobbs, B. E., & Ord, A., 2018. Episodic modes of operation in hydrothermal gold systems: Part II. A model for gold deposition. *Geological Society Special Publication*, 453(1), 147–164. <https://doi.org/10.1144/SP453.15>
- Hodkiewicz, P. F., Weinberg, R. F., Gardoll, S. J., & Groves, D. I., 2005. Complexity gradients in the Yilgarn Craton: Fundamental controls on crustal-scale fluid flow and the formation of world-class orogenic-gold deposits. *Australian Journal of Earth Sciences*, 52(6), 831–841. <https://doi.org/10.1080/08120090500304257>
- Júnior, J. G. R., Lobato, L. M., Lima, L. C., Porto, C. G., & Figueiredo E Silva, R. C., 2015. Metaturbidite-hosted gold deposits, córrego do sítio lineament, quadrilátero ferrífero, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 45(1), 5–22. <https://doi.org/10.1590/23174889201500010001>
- Kreuzer, O. P., Blenkinsop, T. G., Morrison, R. J., & Peters, S. G., 2007. Ore controls in the Charters Towers goldfield, NE Australia: Constraints from geological, geophysical and numerical analyses. *Ore Geology Reviews*, 32(1–2), 37–80. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.12.001>



- Kruhl, J. H., 2013. Fractal-geometry techniques in the quantification of complex rock structures: A special view on scaling regimes, inhomogeneity and anisotropy. *Journal of Structural Geology*. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.10.002>
- Ladyman, J., Lambert, J., & Wiesner, K., 2013. What is a complex system? *European Journal for Philosophy of Science*. Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/s13194-012-0056-8>
- Lester, D. R., Ord, A., & Hobbs, B. E., 2012. The mechanics of hydrothermal systems: II. Fluid mixing and chemical reactions. *Ore Geology Reviews*, 49, 45–71. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.08.002>
- Lisitsin, V., 2015. Spatial data analysis of mineral deposit point patterns: Applications to exploration targeting. *Ore Geology Reviews*, 71, 861–881. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.05.019>
- Mandelbrot, B., 1983. The fractal geometry of nature.
- Munro, M. A., Ord, A., & Hobbs, B. E., 2018. Spatial organization of gold and alteration mineralogy in hydrothermal systems: Wavelet analysis of drillcore from Sunrise Dam Gold Mine, Western Australia. *Geological Society Special Publication*, 453(1), 165–204. <https://doi.org/10.1144/SP453.10>
- Ni, C., Zhang, S., Chen, Z., Yan, Y., & Li, Y., 2017. Mapping the Spatial Distribution and Characteristics of Lineaments Using Fractal and Multifractal Models : A Case Study from Northeastern Yunnan Province ., *Scientific Reports*, (February), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11027-0>
- Ord, A., Munro, M., & Hobbs, B., 2016. Hydrothermal mineralising systems as chemical reactors: Wavelet analysis, multifractals and correlations. *Ore Geology Reviews*, 79, 155–179. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.03.026>
- Raines, G. L., 2008. Are fractal dimensions of the spatial distribution of mineral deposits meaningful? *Progress in Geomathematics*, 17(2), 285–301. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-69496-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69496-0_13)
- Sornette, D., 2004. *Critical Phenomena in Natural Sciences: Chaos. Fractals*. <http://books.google.es/books?id=uYHQHV2hCpwC%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Critical+Phenomena+in+Natural+Sciences#1>
- Turcotte, D. L., 1989. Fractals in Geology and Geophysics. *PAGEOPH*, 131.
- Vearncombe, J., & Zelic, M., 2015. Structural paradigms for gold: Do they help us find and mine? *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section B: Applied Earth Science*, 124(1), 2–19. <https://doi.org/10.1179/1743275815Y.0000000003>
- Xie, S., Cheng, Q., Zhang, S., & Huang, K., 2010. Assessing microstructures of pyrrhotites in basalts by multifractal analysis. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 17(4), 319–327. <https://doi.org/10.5194/npg-17-319-2010>

Zhao, J., Chen, S., Zuo, R., & Carranza, E. J. M., 2011. Mapping complexity of spatial distribution of faults using fractal and multifractal models: Vectoring towards exploration targets. *Computers and Geosciences*, 37(12), 1958–1966. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.04.007>

## CAPÍTULO 2 O CARÁTER MULTIFRACTAL DOS PRINCIPAIS SISTEMAS DE OURO OROGÊNICO EM GREENSTONE BELTS NO MUNDO: ABORDAGEM MULTIESCALA E ESTUDO DE CASO NO DEPÓSITO CÓRREGO DO SÍTIO, GREENSTONE BELT RIO DAS VELHAS, BRASIL

Gustavo Negrello Bergami<sup>1,2</sup>, Carlos Roberto de Souza Filho<sup>1</sup>, Paulo Miguel Haddad-Martim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil

<sup>2</sup>Departamento de Geologia e Recursos Minerais, Serviço Geológico do Brasil, Brasília, Brasil

### RESUMO

Conhecer os fatores que determinam a disposição espacial de depósitos minerais é fundamental para a prospecção de novas ocorrências. Interações fluido-rocha, variações de composição e pH dos fluidos, estruturas geológicas, condições de pressão e temperatura e contrastes litológicos, são processos que atuam em conjunto desde a escala microscópica até vários quilômetros e geram os sistemas minerais responsáveis por acumulações significativas de minerais econômicos. Esta característica de atuação em diversas escalas – por vezes acompanhada pela repetição de características – indica que estes processos são autossimilares, ou seja, apresentam geometria fractal. Pesquisas prévias demonstraram que a atuação conjunta destes processos em sistemas críticos, não-lineares, mantidos distantes do equilíbrio pelo influxo contínuo de calor e fluidos, gera produtos com caráter multifractal, os quais devem ser estudados com métodos apropriados para seu entendimento. Neste contexto, este estudo investigou as características geométricas básicas de sistemas de ouro orogênico em *greenstone belts* Arqueanos com o uso de técnicas de análise fractal e multifractal. Em uma abordagem multiescala, primeiramente foram consideradas feições em escala regional nas principais províncias de *greenstone belts* com depósitos de ouro orogênico no mundo: *Abitibi*, no Canadá, *Norseman-Wiluna*, na Austrália, Rio das Velhas, no Brasil, e *Central Lapland*, na Finlândia, em escala local no contexto do Lineamento Córrego do Sítio. Na escala microscópica, o foco foi sobre o depósito de ouro orogênico do Córrego do Sítio - um dos principais no *greenstone belt* Rio das Velhas. Foram investigadas as dimensões fractais da distribuição espacial dos depósitos, dos lineamentos magnéticos e seus locais de interseção, bem como a distribuição espacial dos minerais de minério em escala microscópica pelo método *box-counting*. Mapas de dimensões fractais de lineamentos magnéticos foram também gerados e confrontados com a distribuição espacial e a tonelagem dos depósitos de ouro em escala regional. As mesmas feições também foram analisadas pelo método multifractal dos momentos. Os resultados nas três escalas foram comparados entre si para identificação de padrões úteis ao entendimento destes sistemas. A partir das análises fractais, observou-se em todas as províncias que as mineralizações possuem padrões de distribuição espacial distintos em escalas diferentes: abaixo de 2km a 4km, de 2km a 4km até 10km a 30km, e acima de 10km a 30km. Com base na análise dos lineamentos magnéticos, verificou-se ainda uma correlação entre os gradientes de variação de dimensões fractais e a tonelagem de ouro contida nos depósitos. Os resultados das análises multifractais apontam a existência de geometria multifractal que se estende desde a escala microscópica até a escala regional. Os índices multifractais  $\Delta\alpha$  (variação de singularidade),  $\tau''(1)$  (índice de multifractalidade) e  $\Delta f(\alpha)$  (variação de espectro multifractal) foram calculados e mostraram relação direta com o *endowment* das províncias estudadas, além de diferenças entre tipos de mineralização em lâmina. Os resultados obtidos demonstram a capacidade das técnicas utilizadas para melhor caracterização dos sistemas minerais estudados. Servem também para a comparação entre sistemas similares em

diferentes escalas e locais e podem ser utilizadas para futuros estudos de outros sistemas minerais com controles similares.

*Palavras-chave:* fractal; depósito de ouro, modelo orogênico, sistemas minerais; autossimilaridade; distribuição espacial; metalogenia; lineamentos magnéticos.

## 1. INTRODUÇÃO

A prospecção mineral, através da modelagem preditiva de potencial mineral, faz uso de informações conhecidas dos processos formadores dos depósitos e do conhecimento empírico das associações entre as mineralizações e objetos ou feições geológicas (estruturas, contatos geológicos) (Lisitsin, 2015). Porém, as limitações no conhecimento destes processos e relações podem levar a erros consideráveis nestes modelos prospectivos, já que há uma chance expressiva de terem sido ignorados processos metalogenéticos importantes. Processos de escala regional, por exemplo, podem passar despercebidos em estudos com o uso de técnicas tradicionais como mapeamento geológico, análise estrutural, petrografia, geoquímica, inclusões fluidas, entre outras. Assim, é importante a busca por técnicas de estudo que possam fornecer novas informações sobre a formação de depósitos minerais.

Depósitos minerais têm sua distribuição espacial determinada pela interação dos inúmeros processos que atuaram no momento de sua formação. Dentre eles, se destacam as interações fluido-rocha, variações de composição e pH dos fluidos, estruturas de micro a macroescala, condições de pressão e temperatura, e a variação de litotipos (Vearncombe and Zelic, 2015). O resultado da combinação de todos estes fatores são sistemas complexos (Ladyman et al., 2013), que atuam como reatores químicos de fluxo aberto, em desequilíbrio através de toda sua evolução, e exibem comportamento não-linear, causado principalmente pela constante adição de calor e fluidos (Lester et al., 2012; Munro et al., 2018; Ord et al., 2012). Estas interações não-lineares de múltiplos processos durante sua formação, como característica essencial deste tipo de sistema, tendem a formação de padrões espaciais ordenados em diversas escalas (Chainais, 2006; Sornette, 2004), com uma repetição de padrões não idênticos, mas similares (Mandelbrot, 1983; Turcotte, 1989). A autossimilaridade em múltiplas escalas é o que permite considerar tais padrões como fractais. Na análise fractal, o padrão de distribuição dos componentes é quantificado por um expoente denominado dimensão fractal. Por serem fenômenos naturais, os sistemas minerais apresentam irregularidades que geram elementos com dimensões fractais distintas e, portanto, sua combinação gera padrões multifractais (Cheng, 1999). Esta característica já foi constatada em diversos estudos com o uso de diferentes técnicas de análise (Hobbs and Ord, 2018; Munro et al., 2018; Ni et al., 2017; Ord et al., 2016).

A partir do reconhecimento da importância de processos em diferentes escalas para a geração de acumulações localizadas de minerais econômicos, o estudo de mineralizações evoluiu das análises em escala de depósito para uma abordagem mais abrangente com o conceito de sistemas minerais (Mccuaig et al., 2010; Ord et al., 2012; Pirajno, 2016). O modelo de depósito estudado neste trabalho, definido como ouro orogênico por Groves et al., (1998), envolve forte controle estrutural. Diversos autores demonstraram que os fluidos mineralizantes são metamórficos, oriundos da desvolatilização de rochas sedimentares marinhas, com liberação de fluidos aqua-carbônicos de baixa salinidade (Gaboury, 2019; Tomkins, 2013), que transportam o ouro ligado principalmente a hidrogenossulfetos ( $\text{HS}^-$ ) (Phillips and Powell, 2010). Acumulações significativas de minério ocorrem quando estes fluidos com ouro em solução são canalizados, acumulados e desestabilizados. Vearncombe and Zelic (2015)

destacam a importância de descontinuidades estruturais (falhas, charneira de dobras, zonas de cisalhamento e contrastes de reologia) neste processo.

O estudo da distribuição espacial de depósitos minerais e de feições lineares como lineamentos estruturais e contatos litológicos, especificamente com técnicas de análise fractal, tem demonstrado capacidade de fornecer informações sobre a atuação de processos distintos em diferentes escalas, ou a relação entre descontinuidades e a ocorrência de depósitos (Carlson, 1991; Carranza, 2009; Hodkiewicz et al., 2005; Kruhl, 2013; Raines, 2008). Sua característica de invariância de escala (Mandelbrot, 1983; Turcotte, 1989) também permite análises em escala de afloramento, no estudo de veios e *stockworks* (Deng et al., 2014; Gumiel et al., 2010), e em escala microscópica, no estudo da distribuição de minerais de minério (Haddad-Martim et al., 2018). Por fazerem uso das mesmas técnicas de análise, os resultados nas diferentes escalas podem ser comparados para fornecer um conhecimento mais abrangente sobre o sistema mineral estudado. Apesar disto, o estudo combinado com análise fractal e multifractal, tanto da análise de distribuição espacial dos depósitos, quanto das estruturas geológicas associadas, foi raramente utilizado para comparar diferentes províncias minerais, com sistemas minerais semelhantes.

A distribuição dos minerais de minério em microescala, de depósitos tipo IOCG (iron oxide copper-gold), já foi relacionada com a configuração dos próprios depósitos em escala regional, e com corpos de minério em escala de depósito (Carranza et al., 2019; Haddad-Martim et al., 2018). Nestes trabalhos, a extração de informações foi feita a partir da obtenção de fotomicrografias orientadas dos sulfetos em lâminas delgadas de amostras de um depósito mineral, com a geração de centroides e imagens binárias destes grãos que foram analisados por técnicas como análise Fry (Fry, 1979), *point pattern analysis* (Boots and Getis, 1988), *best-fit ellipses* (Heilbronner, 2015) e análise fractal por *box-counting* e densidade radial (Carlson, 1991).

Fotomicrografias são representações bidimensionais da distribuição espacial dos minerais em microescala. Para verificar a presença de uma organização multifractal neste tipo de dado, é possível utilizar o método dos momentos (Halsey et al., 1987). Sua aplicação é bastante prática e já provou ser eficiente na análise de minerais em lâmina (Xie et al., 2010). Ela consiste basicamente na análise das feições de interesse, com a passagem de uma grade de tamanho cada vez menor, com sua quantificação e definição de sua autossimilaridade nas diferentes escalas, fornecendo as dimensões fractais do padrão analisado. Por também serem sistemas hidrotermais, depósitos de ouro orogênico exibem a mesma característica de autossimilaridade em diferentes escalas (Kreuzer et al., 2007) e apresentam caráter multifractal (Hobbs and Ord, 2018). Apesar da existência destes estudos, o uso da análise multifractal pelo método dos momentos, até onde se saiba, também nunca foi utilizada para comparação, em diversas escalas, de diferentes províncias de ouro orogênico em *greenstone belts*, o que pode fornecer novas informações úteis ao entendimento deste sistema.

Com o intuito de definir o caráter multifractal deste sistema mineral nas escalas regional, local e microscópica, bem como realizar uma comparação entre diferentes províncias, foram escolhidas quatro áreas de estudo em estágio maduro de exploração, incluindo algumas das principais províncias mundiais de ouro orogênico em *greenstone belts*: *Abitibi*, no Canadá, *Norseman-Wiluna*, na Austrália, Rio das Velhas, no Brasil e *Central Lapland*, na Finlândia. São regiões que possuem exemplos clássicos deste tipo de mineralização e contam com grande quantidade de depósitos, além de disponibilidade de bases de dados confiáveis. Para as escalas local e microscópica, foi escolhida a região do Lineamento Córrego do Sítio, dentro do *greenstone belt* Rio das Velhas. O depósito Córrego do Sítio foi escolhido por ser uma das principais mineralizações de ouro orogênico no

*greenstone belt* Rio das Velhas, além de apresentar claro controle estrutural (Júnior et al., 2015) e integrar um lineamento aurífero homônimo, com expressão regional. Além disso, o depósito apresenta disponibilidade de amostras de testemunhos de sondagem orientados.

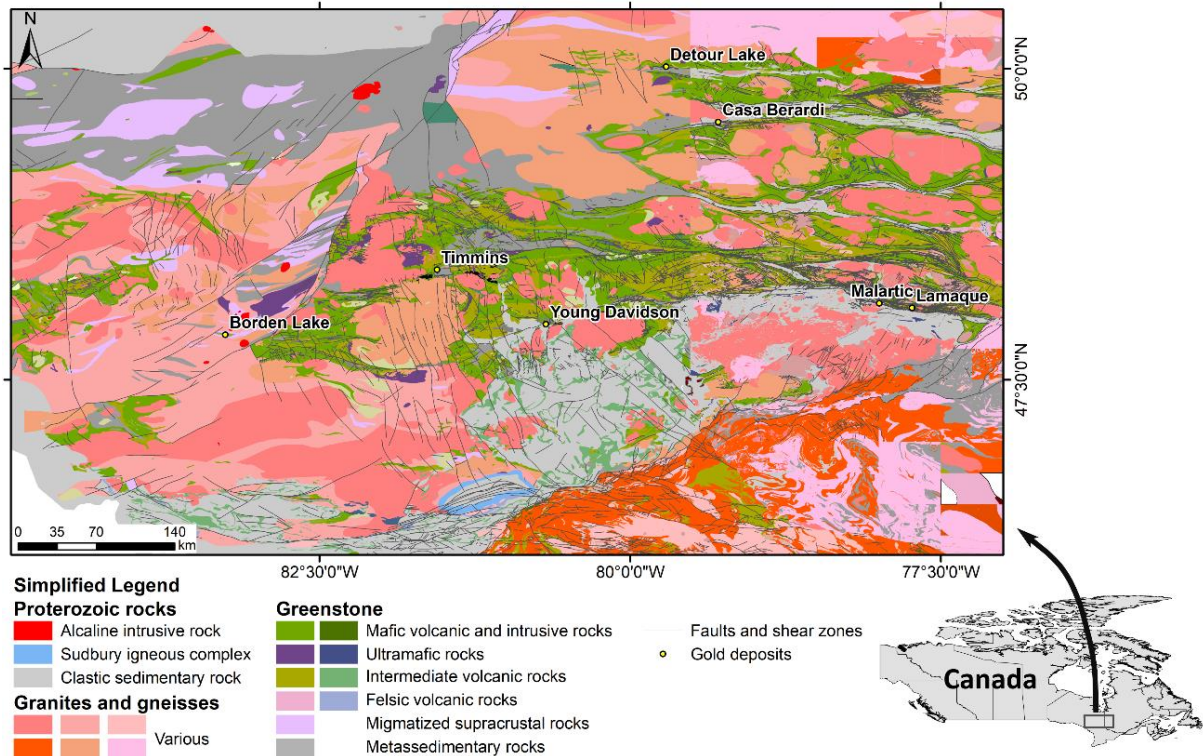
Em uma primeira etapa, foi realizada uma análise comparativa entre as quatro províncias em escala regional, e na escala local, no contexto do Lineamento Córrego do Sítio, com técnicas de análise fractal e multifractal. Foram estudados produtos gerados a partir de dados de livre acesso, como lineamentos e *worms* de imagens de aeromagnetometria, além de bancos de dados com a localização e características básicas dos depósitos e ocorrências de ouro orogênico de cada local. O estudo das imagens aeromagnetométricas foi desenvolvido com a intenção de detectar e analisar a disposição de descontinuidades geológicas nas quatro áreas e sua relação com os depósitos de ouro em escala regional. Índices multifractais  $\Delta\alpha$  (variação de singularidade),  $\tau''(1)$  (índice de multifractalidade) e  $\Delta f(\alpha)$  (variação de espectro multifractal) (Zhao et al., 2011) também foram utilizados para caracterizar a distribuição espacial dos lineamentos magnéticos. Ao fim, foram avaliadas as similaridades e diferenças entre as províncias minerais, bem como a validade dos métodos para o estudo de outras regiões mineralizadas.

Em seguida, para verificar o caráter multifractal da mineralização de ouro orogênico do depósito Córrego do Sítio, no *greenstone* Rio das Velhas, em escala microscópica, foram confeccionadas fotomicrografias orientadas a partir de lâminas petrográficas feitas sobre amostras de testemunhos de sondagem, processadas e submetidas às mesmas análises desenvolvidas na escala regional, para fins de comparação. Além de verificar a existência de distribuição multifractal nos grãos de sulfetos, esta etapa do estudo teve como principal objetivo avaliar a capacidade de comparação entre diferentes tipos de mineralização (disseminada e venular), através dos índices multifractais  $\Delta\alpha$ ,  $\tau''(1)$  e  $\Delta f(\alpha)$ .

## 2. GEOLOGIA DAS ÁREAS ESTUDADAS

### 2.1. ABITIBI, PROVÍNCIA SUPERIOR, CANADÁ

O *greenstone belt* Abitibi faz parte do terreno homônimo e integra a Província Superior, no Canadá (Figura 2.1). Seu embasamento é composto por terrenos granito-gnaiss com idades máximas de 3,8 Ga até 2,82 Ga, sendo o terreno mais antigo dentre as áreas de estudo. A área apresenta rejuvenescimento gradativo de norte a sul, e disposição de terrenos alongados na direção E-W a NW, separados por falhas regionais. Os terrenos foram amalgamados entre 2,72 e 2,68 Ga, em uma sequência de cinco eventos orogênicos (Percival, 2007). Estes eventos geraram magmatismo de arco e deformaram as sequências de rochas supracrustais depositadas entre 2,9 a 2,8 Ga, na porção norte, e entre 2,77 a 2,69 Ga, na porção sul.

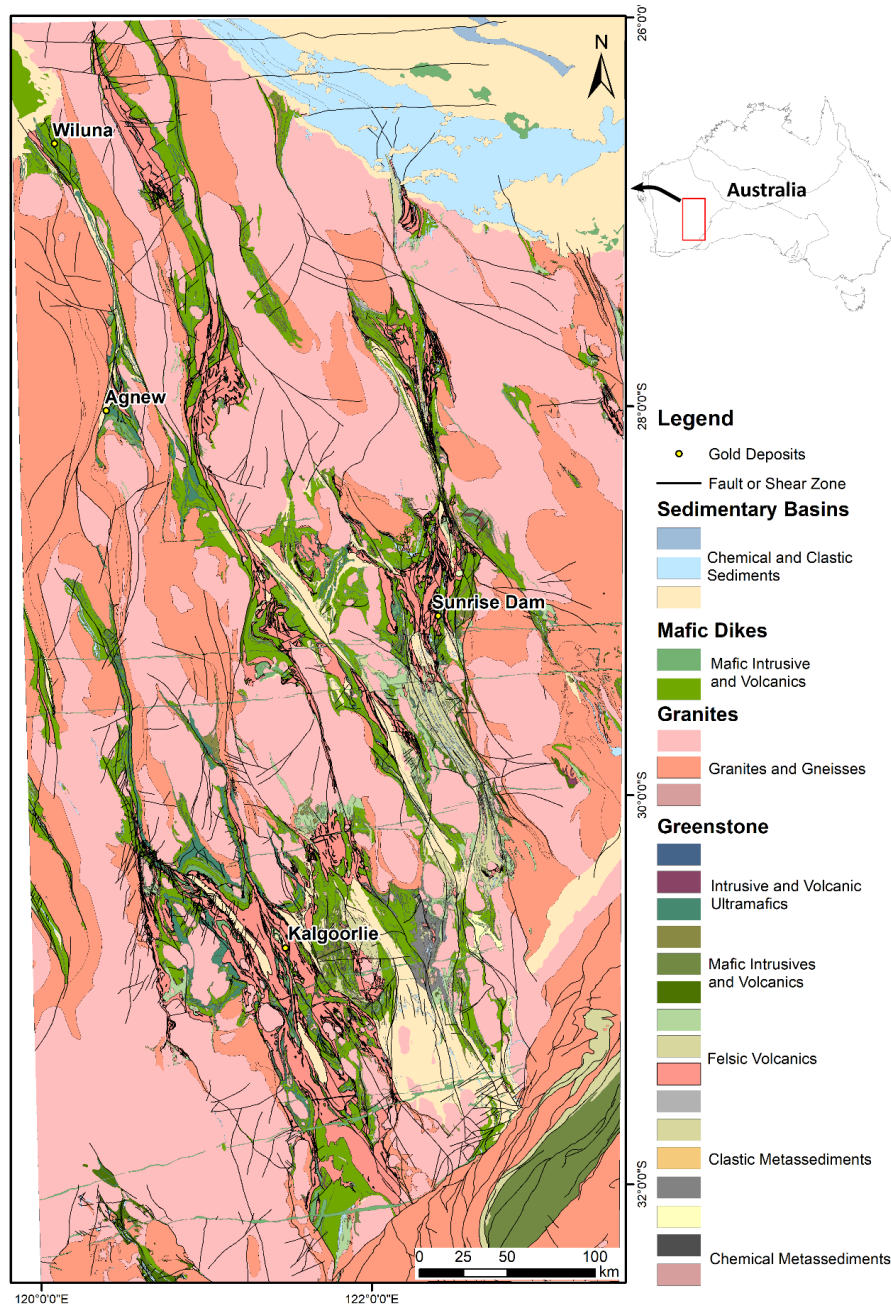


**Fig. 2.1.** Mapa geológico simplificado da área de estudo em Abitibi, com a localização dos alguns dos principais depósitos minerais. Mapa adaptado dos mapas dos serviços geológicos de *Québec* (MERN) e *Ontario* (*Geology Ontario*).

Benn and Peschler (2005) estudaram a deformação da região de Abitibi e propuseram um modelo de dobras de descolamento (*detachment folds*) com a geração de sinclinais e anticlinais regionais, e falhas paralelas aos flancos das dobras. Estes autores propuseram uma evolução em três fases. A primeira ( $D_1$ ) constitui a principal fase de deformação da área, e é representada pelo dobramento isoclinal das camadas sedimentares, com a formação de uma foliação paralela às mesmas. Ocorrem também empurrões com vergência para sul. A segunda fase ( $D_2$ ), tem ocorrência restrita e aparece como dobras em caixa e crenulações, com geração de foliação plano-axial, com direção similar à primeira. A última fase ( $D_3$ ) é tardia, também restrita e gera falhas e zonas de cisalhamento com cristalização de clorita, com direção NW a NE.

## 2.2. NORSEMAN-WILUNA, CRÁTON YILGARN, AUSTRÁLIA

O segundo *greenstone* mais antigo deste estudo, denominado *Norseman-Wiluna*, integra o terreno *Kalgoorlie*, incluso no Cráton *Yilgarn*, na porção denominada *Eastern Goldfields*, Austrália (Groves et al., 1994; Witt et al., 2020) (Figura 2.2). Seu embasamento é composto por terrenos de alto grau a oeste, além de terrenos granito-gnáissicos e rochas metassedimentares, com idades entre 3,75 a 3,3 Ga (Groves et al., 1994). O cráton *Yilgarn* também apresenta configuração em terrenos alongados separados por grandes falhas, porém orientados na direção N-S a N-NW (Witt et al., 2020). Há um aumento na idade das rochas em direção ao oeste. Os granitos apresentam idades de 3,73 a 2,6 Ga. As sequências de rochas juvenis foram depositadas de 3,73 Ga, no terreno *Narryer*, a oeste, até 2,675 Ga, no extremo leste (Witt et al., 2020). Especificamente o *greenstone Norseman-Wiluna* teve sua sedimentação entre 2,71 a 2,69 Ga, com deformação entre 2,71 a 2,62 Ga, dividida em cinco a seis fases principais, com divergências entre diferentes autores (Blewett, 2010; Czarnota et al., 2010; Witt et al., 2020).



**Fig. 2.2.** Mapa geológico simplificado da área estudada, com alguns dos principais depósitos de ouro orogênico. Mapa confeccionado a partir da base de dados do *Geoscience Australia*.

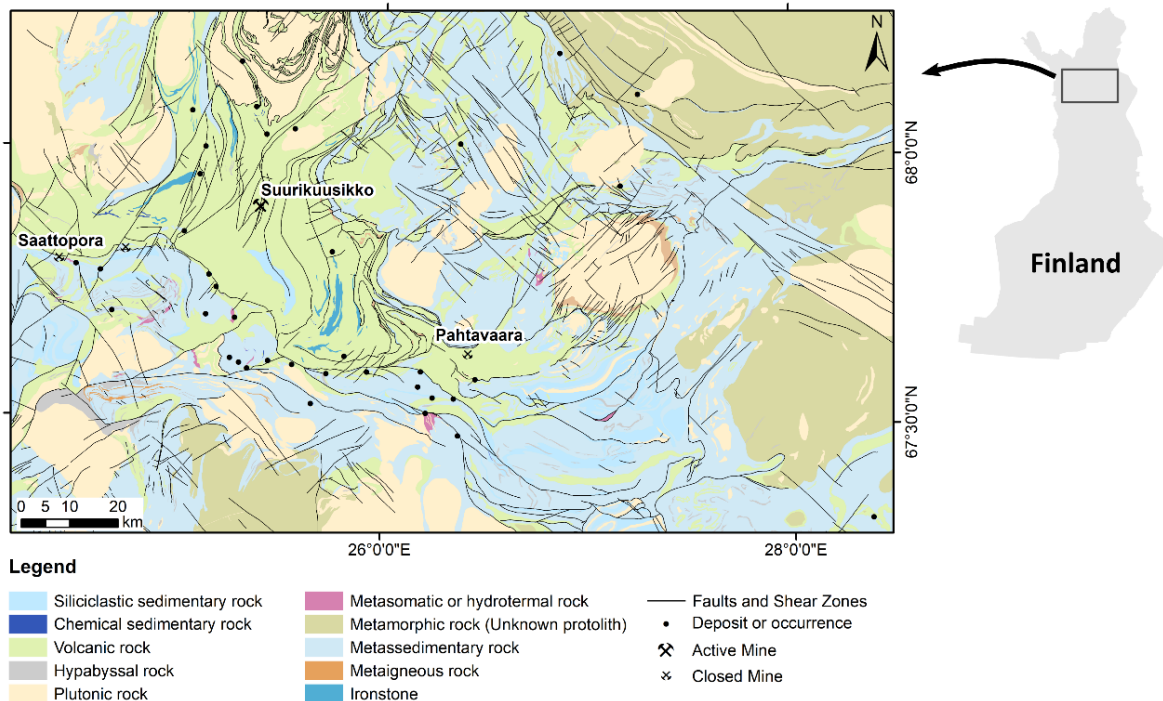
De acordo com Blewett (2010) e Witt et al. (2020) o leste do Cráton *Yilgarn*, onde localiza-se o *greenstone Norseman-Wiluna*, teve uma evolução tectônica constituída por seis fases de deformação. A primeira fase ( $D_1$ ) foi predominantemente extensional, direcionada para E-ENE, refletindo a forma da margem continental da época. Nesta fase, ocorreram as principais falhas de direção N-NNW, reativadas nos eventos subsequentes e também durante a formação dos depósitos de ouro. Em seguida, um evento compressivo perpendicular, com vergência para ENE, gerou dobras de direção NNW e foliação subvertical generalizada, sendo denominado  $D_2$ . O terceiro evento ( $D_3$ ) foi extensivo e responsável pela formação dos domos graníticos regionais e bacias tardias. Na fase seguinte,  $D_4$ , um novo encurtamento com direções variando entre ENE a ESE, comprimiu ainda mais as dobras da segunda fase, e gerou movimento transcorrente sinistral nas falhas NNW pré-existentes. A fase  $D_5$  marcou uma



mudança no campo de tensão para ENE, e gerou movimento dextral em falhas NNE regionais. Finalmente, a fase D<sub>6</sub> foi uma extensão tardia restrita, e marca o fim do tectonismo arqueano.

### 2.3. CENTRAL LAPLAND, FINLÂNDIA

Com idade paleoproterozoica, o *greenstone Central Lapland* representa o conjunto de rochas mais novo deste estudo. Localizado no Escudo Fennoscandiano, na Finlândia (Figura 2.3), apresenta embasamento composto por terrenos granito-gnáissicos de 3,1 a 2,6 Ga (Hanski and Huhma, 2005). A deposição das rochas supracrustais ocorreu a partir de 2,45 Ga, com a geração de komatiitos e riolitos, seguida pela deposição de uma sequência vulcanossedimentar entre 2,4 a 2,0 Ga (Hanski and Huhma, 2005). Há magmatismo granítico entre 1,92 a 1,88 Ga e a intrusão de *sills* acamadados entre 2,22 a 2,05 Ga. Estas sequências foram invertidas entre 1,92 e 1,76 Ga, em cinco fases de deformação (Sayab et al., 2019).



**Fig. 2.3.** Mapa com a geologia simplificada da área de estudo em *Central Lapland*, com a localização dos depósitos de ouro orogênico. Mapa gerado a partir da base de dados do Serviço Geológico da Finlândia (GTK).

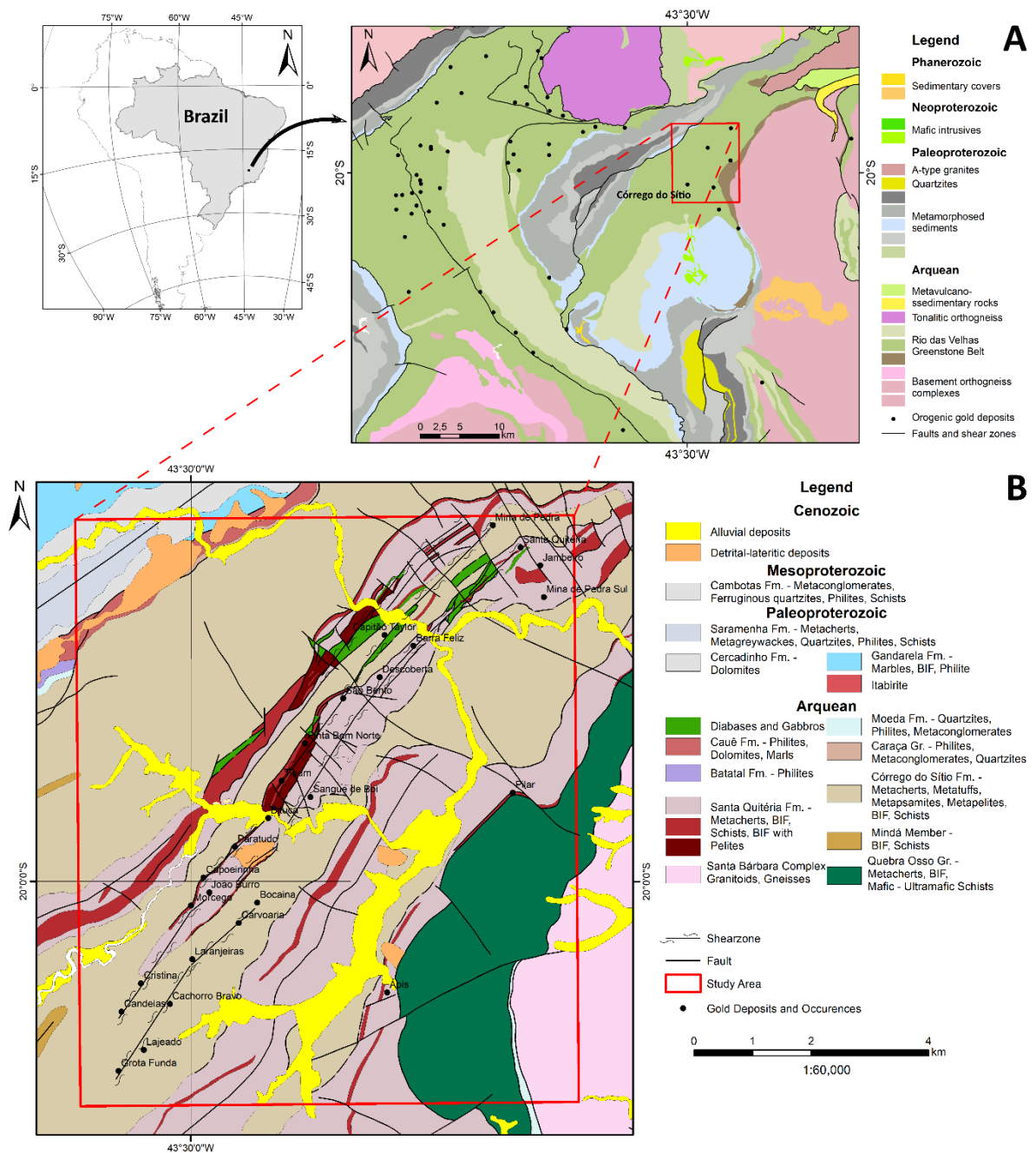
Inicialmente, uma fase compressiva de direção E-W gerou falhas de empurrão na direção N-S. Na segunda fase, uma mudança de 90° no campo de tensão gerou cavalgamentos de direção E-W e afetou as falhas da primeira fase, gerando flexuras regionais nas mesmas. Também ocorrem dobras isoclinais recumbentes de pequena escala, com vergência para norte, que seriam relacionadas a este evento. A terceira fase é definida por uma contração com vergência para NE. Nela, também ocorrem movimentos dextrais nas falhas N-S da primeira fase. Ocorre também uma flexura nas zonas de cisalhamento E-W da segunda fase. A quarta fase (D<sub>4</sub>) é marcada por uma mudança ortogonal no campo de tensão. Esta mudança inverteu a cinemática das zonas de cisalhamento de dextrais para sinistrais. Esta compressão acentuou ainda mais a flexão das zonas de cisalhamento E-W. A última fase (D<sub>5</sub>), produziu falhas transcorrentes dextrais restritas, bem como brechas e fraturas tardias.

#### 2.4. RIO DAS VELHAS, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, BRASIL

O Quadrilátero Ferrífero (QF) está localizado na porção sul do Cráton São Francisco (Figura 2.4). É composto por terrenos granito-gnáissicos (TGG) arqueanos, margeados por sequências supracrustais arqueanas, correspondentes ao *greenstone belt* Rio das Velhas, até paleoproterozóicas, representadas pelo Supergrupo Minas e pelo Grupo Itacolomi (e.g., Farina et al., 2016). O Supergrupo Rio das Velhas (SGRV) é composto por uma sequência de rochas metavulcânicas e metassedimentares, com vulcânicas máficas a ultramáficas na base, seguidas por dacitos, rochas vulcanoclásticas e sedimentos imaturos no topo (Dorr, 1969). As unidades proterozóicas são compostas por metassedimentos de baixo a médio grau metamórfico.

Os complexos do embasamento foram metamorfisados em alto grau em cerca de 3200 Ma, antes do vulcanismo e da deposição dos *greenstone belts*, com idades de 2792 Ma a 2751 Ma (Farina et al., 2016). As rochas metavulcanossedimentares registram ao menos quatro fases de deformação. Duas durante o Arqueano, com metamorfismo de fácies xisto verde a anfíbolito, e duas posteriores - uma relacionada ao Orógeno Minas (Teixeira et al., 2015), entre 2350 a 2100 Ma, e outra fase gerada pela orogenia Brasileira, entre 600 a 400 Ma. Nestas duas últimas fases ocorreu metamorfismo retrógrado de fácies xisto verde (Baltazar and Zucchetti, 2007).

As estruturas da primeira fase (D<sub>1</sub>) estão preservadas na parte sul do QF. São representadas por cavalgamentos de direção E-W com lineações de estiramento *down dip*, que indicam transporte para sul, dobras fechadas a isoclinais com eixos para ENE e vergência para S, e foliação plano axial S<sub>1</sub>. A segunda fase (D<sub>2</sub>), também arqueana, tem suas estruturas preservadas na porção central da área. Estas possuem vergência para SW e são constituídas por empurrões de direção NW, dobras fechadas a isoclinais e foliação plano axial S<sub>2</sub>, que por vezes transpõe os planos axiais e gera zonas miloníticas de direção principal 060/35 com lineações de estiramento entre 070/25 a 060/20. A fase D<sub>3</sub> está relacionada à formação dos sinclinais regionais que dão a forma retangular ao QF, com uma etapa inicial, compressiva, com vergência para NW, seguida por um período de extensão, com o soerguimento dos complexos de TTGs arqueanos, em geometria típica de domo e quilha (Alkmim and Marshak, 1998). A última fase de deformação (D<sub>4</sub>), tem maior expressão na porção leste da área. Ocorrem zonas de cisalhamento de direção N-S, dobras fechadas a isoclinais com vergência para oeste, e crenulações e clivagens de fratura com direção N-S. A ocorrência de D<sub>4</sub> provocou ainda a reativação de estruturas da fase D<sub>3</sub>.



**Fig. 2.4.** Mapas de localização com as áreas de estudo regional (A) e local, no Lineamento Córrego do Sítio (B), com os depósitos e ocorrências de ouro analisados no trabalho. Mapa regional feito a partir do mapa geológico do estado de Minas Gerais. Mapa local gerado a partir do mapa 1:50.000 do projeto ARIM Quadrilátero Ferrífero. Fonte: SGB/CPRM.

## 2.5. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS MINERAIS ESTUDADOS

As quatro áreas estudadas possuem sistemas minerais de ouro orogênico que possibilitaram a migração e a acumulação de grandes volumes de fluidos mineralizantes, além da sua deposição e a preservação dos depósitos ao longo da história geológica. A presença de discontinuidades em escala crustal, na forma de grandes zonas de cisalhamento, é um elemento importante para a geração de depósitos de ouro orogênico. Estas estruturas canalizaram os fluidos mantélicos e crustais, ricos em ouro (Groves et al., 2018), e os distribuíram em estruturas de segunda e terceira ordem.

Outro elemento importante é a fonte dos fluidos. Groves et al. (2020) apontaram os principais reservatórios de fluidos como sendo o manto sub-litosférico metassomatizado e a desidratação da pilha sedimentar oceânica. Estes autores também indicaram a necessidade de uma fonte de energia para o sistema, representada na forma de uma zona de subducção, e da elevação da astenosfera gerada por ela. Trapas estruturais, representadas por antififormes apertados e rompidos, margens cisalhadas de pequenos corpos graníticos, e junções tríplices entre intrusões adjacentes, além de um “lacre” estratigráfico, representado por litologias impermeáveis, são outras características importantes para a efetiva formação de acumulações econômicas de ouro nestes sistemas. As idades das mineralizações, grandes estruturas e suas direções principais estão resumidas na tabela 1.

Algumas características em comum entre os sistemas minerais estudados são: (i) deposição do ouro em zonas de cisalhamento que cortam as rochas supracrustais juvenis que compõem os *greenstone belts*, particularmente quando estas zonas interceptam antififormes, ou contatos entre rochas de reologia distinta; (ii) tectônica polifásica, com grandes falhas que por vezes atingem o manto e apresentam histórico de reativações.

**Tabela 1.** Idades e principais macro-estruturas relacionadas às mineralizações, e suas respectivas direções predominantes.

Greenstone Belt	Idade da mineralização	Macro-estruturas	Direção	Fonte
Norseman-Wiluna	2.665-2.62 Ga	Falha de <i>Ida</i> ; Zona de Cisalhamento <i>Ockerburry</i> ; Domos D <sub>3</sub> - ( <i>Golden Corridor</i> )	NNW-NW	(Blewett 2010)
Abitibi	2.69-2.68 Ga	Falha Porcupine-Destor; Falha Larder Lake-Cadillac	WNW-NW	(Percival 2007)
Central Lapland	1.92-1.76 Ga	Zona de Cisalhamento <i>Kiistala</i> ; Zona de Empurrão <i>Sirkka</i>	NNE-NS-NNW ( <i>Kiistala</i> ); NW-WNW ( <i>Sirkka</i> )	(Sayab et al. 2019)
Rio das Velhas	2.75-2.67 Ga	Zonas de Cisalhamento Paciência, São Vicente e Raposos; Lineamento Córrego do Sítio	NW-NE-NS	(Baltazar and Zucchetti 2007; Júnior et al. 2015)

## 2.6. GEOLOGIA DO LINEAMENTO CÓRREGO DO SÍTIO

Localizado na parte nordeste do Quadrilátero Ferrífero, o lineamento estrutural Córrego do Sítio compreende um conjunto de zonas de cisalhamento auríferas denominadas Cristina, São Bento e Córrego do Sítio, com direção NE-SW e extensão de cerca de 16 km (Fig. 2.4; (Lima, 2012). Inserido no contexto do Grupo Nova Lima, apresenta predominância metagrauvascas e filitos carbonosos, pertencentes à unidade homônima, além da presença de metapelitos carbonosos intercalados com espessas camadas de metacherts e formações ferríferas bandadas, relacionados à unidade basal, Santa Quitéria (Porto, 2008). Além disto, ocorrem diques metamáficos de

direção NNE-SSW e mergulho para SE, subparalelos a discordantes da foliação principal, com alteração hidrotermal clorítica, carbonática e sericítica de intensidade variável (Júnior et al., 2015; Pereira et al., 2013).

Lima (2012) definiu três subdivisões estratigráficas informais, baseadas nas proporções dos diferentes tipos de rocha para a unidade Córrego do Sítio, sendo, de leste para oeste, uma subunidade inferior, composta principalmente por filitos carbonosos e grauvacas, com porções menores de BIF intercalado com filitos carbonosos; uma subunidade intermediária, que hospeda a maior parte da mineralização, exibe feições estruturais bem definidas, como foliação anastomosada, com veios de quartzo-carbonato milimétricos a métricos, e camadas com dobras assimétricas e transpostas localmente; e uma terceira subunidade, superior, que apresenta maior quantidade de rochas psamíticas, com rochas pelíticas subordinadas, e com sequências de camadas com granodrecrescência ascendente normal e invertida.

## 2.7. MINERALIZAÇÃO DO LINEAMENTO CÓRREGO DO SÍTIO

O lineamento aurífero Córrego do Sítio possui diversos depósitos, sendo os principais: Cachorro Bravo, Laranjeiras, Carvoaria, Bocaina, Mutuca, Lajeado, Grota Funda, Santana, Sangue de Boi, Barra Feliz, Anomalia 1 e Santa Quitéria, que, juntos, totalizam recursos da ordem de 5,32 Moz (Martins, 2017). De acordo com Júnior et al. (2015), a mineralização aurífera está relacionada majoritariamente à veios de quartzo estreitos e *boudins* alongados com direção N20-30E e mergulho entre 60° e 70° para SE. Estes veios ocorrem principalmente no contato entre as rochas metassedimentares e as metamáficas. Zonas de cisalhamento e dobras relacionadas à foliação principal  $S_{1-2}$  são locais com ocorrência de veios com espessuras entre 0,1 a 5 m, chegando a 10 m, localmente.

Pereira et al. (2013) definiram cinco gerações de veios predominantemente quartzosos. Destes, apenas a primeira geração ( $V_1$ ) encontra-se mineralizada, e foi dividida em 3 famílias:  $V_{1a}$ ,  $V_{1b}$  e  $V_{1c}$ . Todos apresentam, na sua composição principal, anquerita, sericita e clorita, com variação no tipo de quartzo, sendo fumê no primeiro, leitoso no segundo, e ambos no terceiro. Como minerais acessórios, todos possuem pirita, pirrotita e esfalerita, com arsenopirita, berthierita, estibinita e ouro livre apenas nos dois primeiros ( $V_{1a}$  e  $V_{1b}$ ) e calcopirita apenas em  $V_{1a}$ . De acordo com Lima (2012) o ouro encontra-se em cinco associações:

1. Na forma livre e *electrum*, disseminados nos veios de quartzo-carbonato cinzas fumês e brancos;
2. Incluso na berthierita, apenas nos veios  $V_{1a}$ , com quartzo fumê, na forma venular;
3. Incluso na arsenopirita, disseminada paralelamente à foliação principal e/ou às camadas litológicas, na forma de partículas microscópicas a submicroscópicas, em associação com partes micáceas da rocha;
4. Incluso em pirita ou pirrotita, também disseminadas junto à foliação principal, e em camadas da rocha encaixante, junto aos minerais micáceos;
5. Incluso em silicatos (quartzo ou micas) acompanhando o contato entre veios e bandas sericíticas, com forma considerada venular para os critérios do estudo.

### 3. BASES DE DADOS

#### 3.1. DADOS EM ESCALA REGIONAL

##### 3.1.1. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS DEPÓSITOS DE OURO OROGÊNICO

Considerando-se a consistência na classificação de depósitos minerais das bases de dados obtidas junto aos serviços geológicos da Austrália (*Geoscience Australia*), Brasil (SGB) Finlândia (GTK), de Ontário (*Geology Ontario*) e Quebec (MERN), foi possível isolar os depósitos e ocorrências de ouro orogênico de cada local de depósitos atribuídos a outros processos metalogenéticos.

##### 3.1.2. AEROMAGNETOMETRIA

Da mesma forma que as ocorrências minerais, bases de dados de aeromagnetometria foram obtidas com os serviços geológicos de cada local. Suas características principais estão descritas na tabela 2. Os dados magnéticos já vieram processados com a redução diferencial ao polo e inclinação e declinação magnéticas calculadas. Foi utilizado o software *Geosoft Oasis Montaj* para o processamento dos dados. Foram aplicados inicialmente filtros de análise qualitativa de amplitude do sinal analítico (ASA) (Nabighian, 1972), e gradiente horizontal total (GHT) (Cordell e Grauch, 1985) para detecção das bordas e centro das fontes causativas. Por serem afetados pela profundidade das fontes, com a atenuação dos sinais profundos, foram aplicados os filtros de inclinação do sinal analítico (ISA) (Miller and Singh, 1994) e inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total (ISA-GHT) (Ferreira et al., 2013). O ISA equaliza as amplitudes e elimina a dependência da profundidade, posicionando os valores máximos diretamente sobre os corpos magnéticos (Oliveira, 2019). Já o ISA-GHT posiciona os valores máximos nas bordas dos corpos, facilitando sua delimitação. Para eliminar as fontes rasas, provavelmente sem relação com os depósitos minerais, os filtros qualitativos foram aplicados sobre os dados continuados para cima em 100, 200, 500 e 1000 m. As imagens foram interpretadas com base na classificação sugerida pela ASEG (*Australian Society of Exploration Geophysicists*) (Isles and Rankin, 2013).

Para estimar as fontes anômalas e melhor definir as estruturas profundas, foram utilizados mapas com soluções de Euler (Thompson, 1982) até 1000m de profundidade. Com isto, há maior confiabilidade para as estruturas correlatas às deconvoluções de Euler e nos outros mapas filtrados. Segundo Oliveira (2019), este método calcula as profundidades e a posição das fontes magnéticas a partir da solução das equações de homoneidade de Euler, e considera a intensidade do campo potencial, seus gradientes nas três direções espaciais e o índice estrutural, uma medida da forma das anomalias magnéticas. Com o intuito de modelar estruturas de escala crustal e sua relação com os depósitos minerais, foram gerados mapas tridimensionais de detecção de bordas multiescala (Archibald et al., 1999), conhecidos como mapas de *worms* magnéticas, com o uso do módulo *multi-scale edge detection wizard* do software INTREPID. Nesta técnica, como descrito por Oliveira (2019), é aplicado o filtro de continuação ascendente para diversas alturas, seguido pelo cálculo de seu gradiente horizontal. Os locais com gradientes máximos são representados como feições lineares denominadas *worms*. Por mapear áreas com grande variação no campo magnético, esta técnica define regiões de contatos geológicos, muitas vezes relacionados a falhas ou zonas de cisalhamento, e suas profundidades de ocorrência. Considerando a profundidade média da crosta terrestre, foram modeladas *worms* com profundidade máxima de 32 quilômetros.

**Tabela 2.** Características dos aerolevantamentos utilizados. Informações obtidas junto aos fornecedores dos dados.

	Direção das linhas de voo	Altura de voo	Espaçamento
Abitibi	N-S	100-305m	200-800m
Central Lapland	N-S, E-W	150m	400m
Norseman-Wiluna	E-W	60m	100-400m
Rio das Velhas	N40W, N50E	80m	250m

### 3.1.3. DADOS DO LINEAMENTO CÓRREGO DO SÍTIO

A análise da distribuição espacial das mineralizações de ouro foi feita sobre um conjunto de depósitos e ocorrências na região do lineamento Córrego do Sítio obtido no trabalho de Pereira et al. (2013), juntamente com uma base de dados do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) de 2014. Vinte e seis depósitos e ocorrências de ouro orogênico foram consideradas. Foi utilizado o mapa geológico do SGB em escala 1:25.000. Os lineamentos magnéticos analisados foram os mesmos da escala regional.

### 3.1.4. DADOS NA ESCALA MICROSCÓPICA

O estudo em escala microscópica foi desenvolvido a partir análise de 30 fotomicrografias orientadas e georreferenciadas, obtidas de 15 lâminas petrográficas polidas, confeccionadas sobre 12 amostras mineralizadas de testemunhos de sondagem orientados do Alvo Mutuca, localizado a sudeste do corpo mineralizado Cristina, e cedidas pela empresa AngloGold Ashanti Córrego do Sítio. O processamento das lâminas foi desenvolvido a partir de uma adaptação do procedimento criado por Haddad-Martim et al. (2018). Ele envolve a necessidade de que lâminas sejam confeccionadas no plano horizontal, o que, apesar de não ser ideal para análises cinemáticas, fornece o mesmo ponto de vista dos mapas regionais e locais. Isto é importante, já que, como o trabalho envolve a análise de características geométricas para revelar processos mineralizantes em diferentes escalas, a confecção de lâminas no plano horizontal permite uma comparação direta entre as diferentes escalas de observação.

## 4. MÉTODOS

### 4.1. ANÁLISE FRACTAL

O método do *box-counting* é o mais apropriado para análise de feições bidimensionais, como a distribuição espacial de pontos geográficos, no caso, os depósitos minerais, e de feições lineares, como estruturas ou contatos geológicos (Kruhl, 2013). Sua implementação está descrita com mais detalhes no material suplementar. Os depósitos de ouro orogênico das quatro áreas de estudo tiveram sua distribuição espacial analisada através do método *box-counting*. As análises foram executadas com o auxílio do programa *Fractal Tools* (Haddad-Martim et al., 2017); [https://github.com/pmhaddad/geo\\_fractal\\_tools](https://github.com/pmhaddad/geo_fractal_tools)), uma *toolbox* desenvolvida para uso no *software* ESRI ArcGIS 10.4 ou superior. Também foi empregada a técnica do *box-counting* para análise dos mapas de lineamentos. Executado a partir de um programa criado por Prado et al. (2020) ([https://github.com/Eliasmprado/GeologicalComplexity\\_SMOTE](https://github.com/Eliasmprado/GeologicalComplexity_SMOTE)), a imagem de lineamentos é convertida em

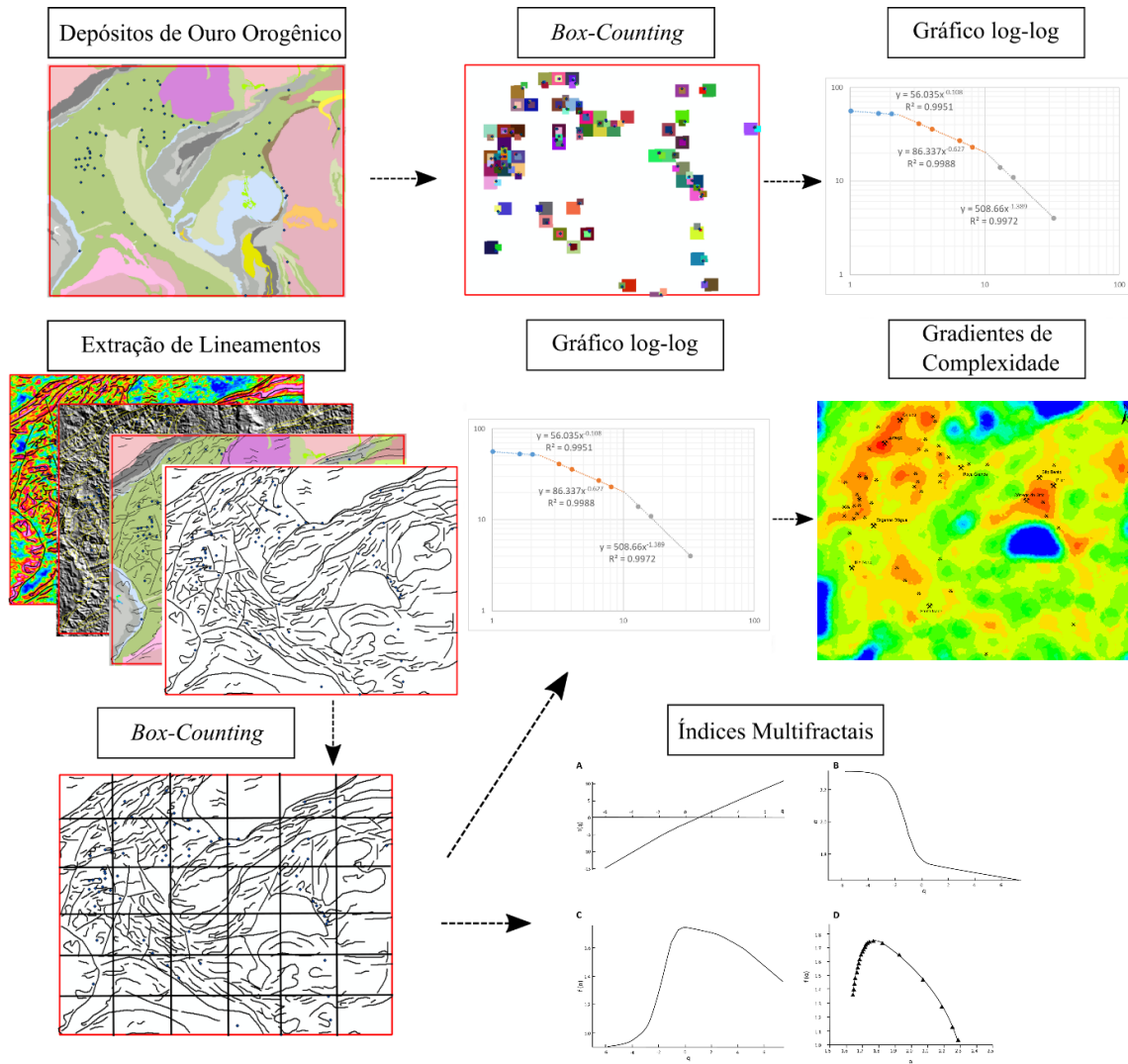
um *raster* com células com largura inicial pré-definida, submetidas a um processo iterativo de  $n$  etapas de redução pela metade, com posterior inserção em gráficos logarítmicos, de forma similar à análise dos depósitos (Figura 4.1).

Após a realização de alguns testes, foram escolhidas as larguras iniciais de células e quantidade de iterações ideais para cada área e feição analisada, tanto para a distribuição dos depósitos, com a análise das melhores regressões lineares nos gráficos log-log, quanto para os lineamentos magnéticos ou suas interseções, a partir da inspeção visual da melhor relação com os locais de ocorrência de depósitos. Para a região de *Abitibi*, a distribuição dos depósitos foi analisada com células de tamanho inicial de 75 km, reduzidas até 1 km, enquanto a análise dos lineamentos magnéticos foi conduzida com uma grade com células de 5 km de largura inicial, reduzidas em 5 iterações, até 156,25 m. Para as interseções de lineamentos magnéticos, os melhores resultados foram obtidos com células de largura inicial de 20 km, com sete divisões pela metade, até uma largura final de 312,5m. No *greenstone belt Norseman-Wiluna*, foram usadas células de 175 km até 1 km na análise da configuração espacial das mineralizações. Já no estudo das feições lineares e suas interseções, foram utilizadas células de mesmo tamanho que as de *Abitibi*, com obtenção de resultados satisfatórios. Na área de Rio das Velhas, os pontos de localização dos depósitos foram analisados com caixas de tamanho inicial de 32,5 km até 1 km. Já a grade para análise dos lineamentos magnéticos teve células de 1 km de largura inicial, com 4 reduções pela metade, terminando em 62,5 m, enquanto para suas interseções iniciou em 2 km e terminou em 125 m. Já em *Central Lapland*, o *box-counting* dos depósitos foi iniciado com largura de 90 km, e terminou com 5,5 km, enquanto a grade inicial da análise dos lineamentos contou com células de largura 2,5 km, reduzidas 4 vezes até 156,25 m, e 5 km para as suas interseções, com aresta final de 78,125 m após seis iterações.

Na análise dos lineamentos magnéticos e suas interseções, após o cálculo da dimensão fractal de cada célula, foi gerada uma grade com os valores das dimensões fractais. Estes valores foram então interpolados no *software* ArcGIS 10.8, com a técnica de krigagem exponencial de raio variável, com mínimo de 12 pontos de interpolação, no caso dos mapas de lineamentos, e com *spline* de tensão com 12 pontos de interpolação, para os mapas de pontos de interseção. O resultado é denominado mapa de complexidade geológica, já que indica a variabilidade na distribuição de estruturas e contatos geológicos interpretados na forma de lineamentos magnéticos.

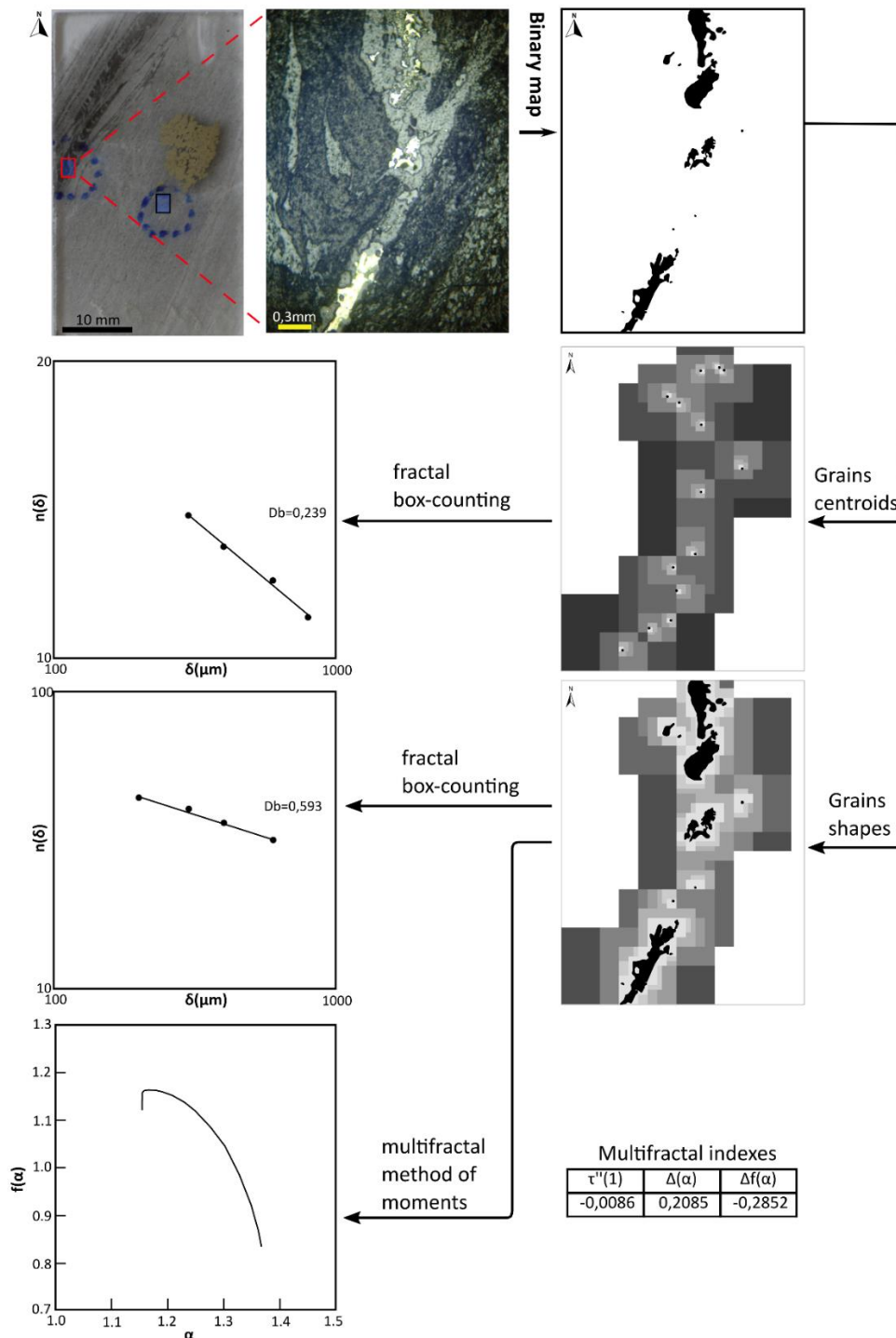
O processo de análise em escala microscópica está ilustrado na figura 4.2. Ele consiste em um fluxo de trabalho bem definido, no qual é feita a descrição das lâminas e seleção de locais para as fotomicrografias. Foi utilizada uma câmera digital Sony *Cybershot*, de 24 MP, acoplada ao microscópio petrográfico, e obtidas imagens com as bordas coincidentes com a direção N-S, sob luz refletida, com a mesma dimensão e nível de ampliação. Em casos em que o campo de observação não foi suficiente para capturar um número suficiente de grãos minerais, foram tiradas fotos adjuntas, que foram posteriormente coladas com o uso do *plugin MosaicJ* (Thévenaz and Unser, 2007), disponível no *software Fiji ImageJ* (Schindelin et al., 2012).





**Fig. 4.1.** Fluxograma com as etapas desenvolvidas nas escalas regional e local. Os depósitos e lineamentos magnéticos interpretados foram analisados pela técnica do *box-counting*. Nesta técnica, foram geradas as dimensões fractais de sua distribuição espacial, bem como os índices multifractais  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta f(\alpha)$  e  $\tau''(1)$  para a distribuição dos lineamentos magnéticos

As imagens binárias foram então analisadas com o algoritmo *Analyze Particles*, no software *ImageJ*, que calcula diversos parâmetros geométricos das partículas, dentre eles a posição dos centroides (pontos centrais) dos grãos. Os parâmetros obtidos e as imagens binárias foram então adicionados ao software ESRI ArcGIS, para continuidade das análises. Os métodos de análise utilizados se baseiam em duas propriedades geométricas dos minerais de minério: (i) sua distribuição espacial, representada através dos seus centroides, e (ii) suas formas, registradas na forma dos mapas binários. Tanto os centroides como as formas dos grãos foram analisados por *box-counting*, e as últimas também foram inspecionadas através do método multifractal dos momentos.



**Fig. 4.2.** Fluxo de trabalho com as lâminas de amostras de testemunhos de sondagem, para coleta de dados e análise. Este procedimento foi repetido para todas as 30 fotomicrografias. As lâminas foram confeccionadas com suas bordas na direção norte-sul (topo à esquerda). Fotomicrografias foram obtidas sob luz refletida e um mapa binário com os minerais de minério foi confeccionado. A partir deste mapa, foram desenvolvidas análises fractais por *box-counting* e multifractais pelo método dos momentos.

As imagens resultantes foram separadas em dois tipos, considerando a característica do minério, em disseminado e preenchimento de veios. Isto foi feito devido ao caráter hidrotermal da mineralização em Córrego do Sítio, onde a forma de percolação dos fluidos e sua precipitação são importantes no seu entendimento. No caso, o minério disseminado seria gerado pela percolação por microfraturas, em uma fase inicial mais quente e dúctil, e

precipitado pela reação com as rochas encaixantes. Já o minério venular seria formado pelo preenchimento de fraturas maiores, geradas em um momento tardio, com menor temperatura e comportamento mais rúptil (Ord et al., 2012). Assim, estes dois tipos representam dois momentos distintos da mineralização, com diferentes características de permeabilidade que controlaram sua formação. As imagens foram classificadas como de preenchimento de veios, quando claramente relacionadas a veios e fraturas. As outras imagens foram classificadas como disseminadas.

A existência de geometria fractal nas formas dos minerais em microescala já foi demonstrada em estudos anteriores, tendo sido originada, por exemplo, por condições físico-químicas que controlaram a distribuição de cristais de quartzo, plagioclásio e feldspato potássico em rochas ígneas (Peternell and Kruhl, 2009), ou de cristais de cassiterita (Zuo et al., 2009), ou também pela deformação em grãos de magnetita (Mamtani, 2012) ou quartzo (Wang et al., 2007). Desta forma, foram desenvolvidas análises fractais nos grãos de sulfetos, para verificar a existência de geometria fractal e obter mais informações sobre seus processos formadores. O método *box-counting* foi utilizado para analisar a distribuição espacial dos depósitos e ocorrências do lineamento Córrego do Sítio, e dos centroides e mapas binários dos sulfetos em lâmina. Para os depósitos, a análise foi conduzida com caixas de lado igual a 4,25 km, equivalente à metade da largura da área de estudo, e reduzidas gradativamente até 625 m. Medidas com caixas menores foram descartadas por apresentarem efeitos de sub-amostragem, já que não havia aumento na quantidade de feições detectadas ao diminuir a dimensão das caixas. Na escala microscópica, a análise por *box-counting* foi conduzida com caixas de tamanho inicial 680  $\mu\text{m}$ , gradativamente reduzidas até 42,5  $\mu\text{m}$ . Caixas com arestas inferiores a 85  $\mu\text{m}$  englobam apenas um centroide e sua redução não implica em um maior número de caixas, gerando efeitos adversos de sub-amostragem, comuns a esse método (Blenkinsop and Sanderson, 1999), por isso não foram consideradas.

#### 4.2. ANÁLISE MULTIFRACTAL

A geometria fractal foi desenvolvida inicialmente para estudar propriedades intrínsecas de formas geométricas, o que permite utilizá-la para estudar depósitos minerais em escala regional ao reduzi-los a uma distribuição geométrica de pontos. Entretanto, ao atribuir valores de outras propriedades a estes pontos (p.ex., a tonelagem do depósito), cada medida assume uma distribuição e, portanto, uma dimensão fractal, o que constitui um espectro multifractal (Xie and Bao, 2004). Isto também é válido no caso da análise de lineamentos, sendo que, neste caso, os valores são referentes ao número de feições em cada célula, ou seu comprimento total.

Multifractais podem ser relacionados às distribuições probabilísticas, como a distribuição log normal, bastante usada para caracterizar a distribuição e teores de minérios (Arias et al., 2011). Diversos autores fizeram uso de multifractais para caracterizar a autossimilaridade de propriedades que apresentam valores variáveis, como análises geoquímicas (Agterberg et al., 1996; Cheng, 1999; Deng et al., 2011), bem como para analisar a distribuição de tonelagem e o teor de depósitos em escala regional (Ford, 2007) e a distribuição de lineamentos (Ni et al., 2017; Zhao et al., 2011).

Pesquisas recentes vêm demonstrando que os sistemas minerais hidrotermais apresentam geometria multifractal que resultam da interação entre diversos processos naturais na forma de sistemas complexos (Lester et al., 2012; Munro et al., 2018; Ord et al., 2012; Ord and Hobbs, 2018). Isto ocorre pois muitos destes processos são fractais e até multifractais em si, tais como a formação de permeabilidade por fraturamento (Swain et al., 2019), variações de pH e temperatura (Bansal et al., 2016; Zuo et al., 2009), ou variações nas concentrações de

ouro em solução (Wang et al., 2010). Assim, é esperado que a expressão das formas dos minerais gerados durante o processo mineralizante também apresente caráter multifractal. As estruturas e contatos geológicos, por também serem o resultado de um conjunto de processos naturais com caráter fractal intrínseco, apresentam expressão geométrica multifractal. Sendo assim, os lineamentos magnéticos interpretados para uma área, por serem a representação destas estruturas e contatos, igualmente possuem esta característica (Ni et al., 2017; Zhao et al., 2011).

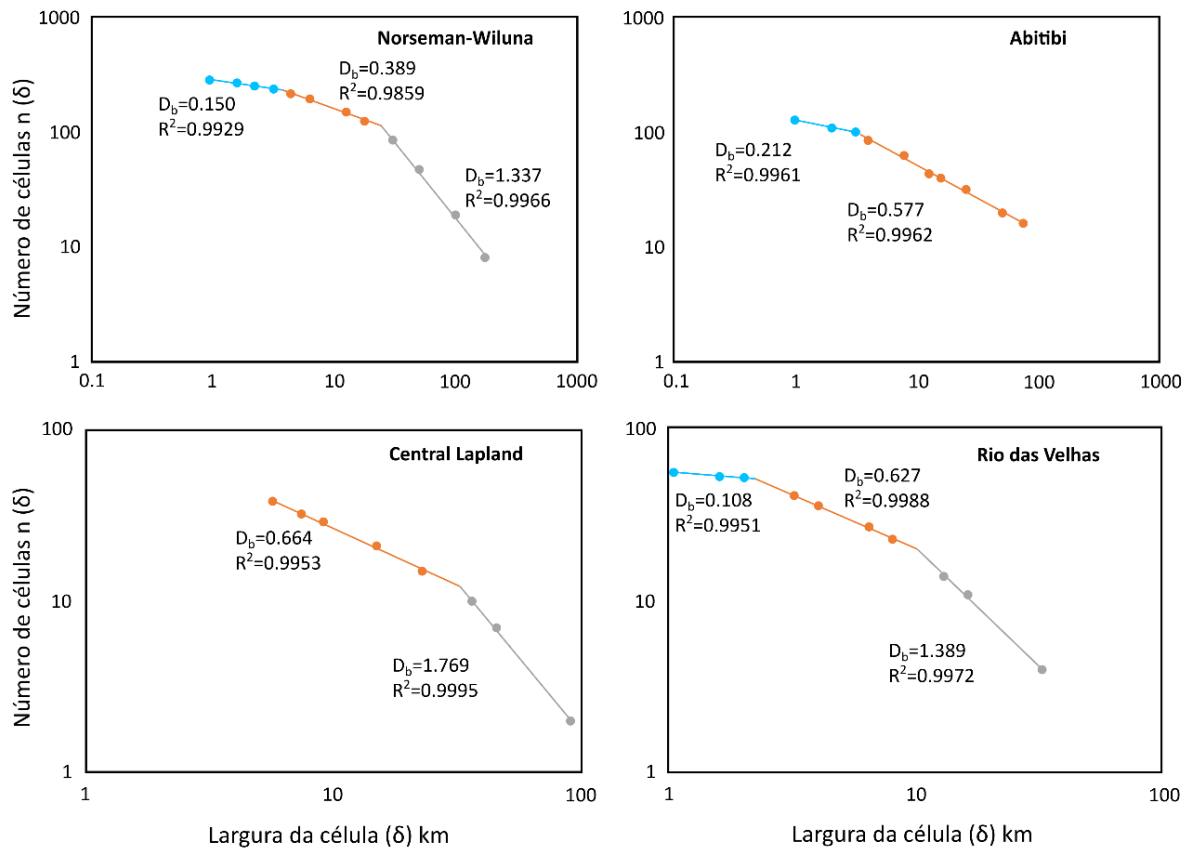
Neste estudo, o método dos momentos (Halsey et al., 1987) (mais informações no material suplementar) foi utilizado para identificar se os lineamentos magnéticos interpretados para a região do Lineamento Córrego, bem como as formas dos grãos de sulfetos, apresentam caráter multifractal. O cálculo dos parâmetros multifractais  $\Delta\alpha$  (variação de singularidade),  $\tau''(1)$  (índice de multifractalidade) e  $\Delta f(\alpha)$  (variação de espectro multifractal), permitiu obter mais informações sobre as feições analisadas. O parâmetro  $\Delta\alpha$ , é calculado como  $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ , no qual  $\alpha_{\max}(Q_{\min})$  e  $\alpha_{\min}(Q_{\max})$  representam os maiores e menores valores de  $\alpha$ , respectivamente. Foi demonstrado que quanto mais negativo for seu valor, maior é a irregularidade do padrão de distribuição, maiores são as quantidades de segmentos e seus comprimentos totais, e maior será a quantidade de corpos de minério na área de estudo (Zhao et al., 2011). O parâmetro  $\Delta f(\alpha)$  é calculado como  $f(\alpha)_{\max} - f(\alpha)_{\min}$ , e valores negativos indicam a predominância de células com maiores valores, ou seja, uma maior dispersão das feições, e valores positivos, células com menores valores ou ausência de feições, e podem significar maior agrupamento espacial. O parâmetro  $\tau''(1)$ , calculado como  $\tau''(1) = \tau(2) - 2\tau'(1) + \tau(0)$ , onde  $\tau'(1)$  é igual a zero, de tal forma que  $\tau''(1) = D_2 - D_0$  (Zhao et al., 2011). Este parâmetro sempre terá valor negativo se a distribuição analisada for multifractal. Seu valor é diretamente proporcional ao grau de irregularidade e complexidade das distribuições das feições de cada local.

Ambos os mapas, de lineamentos e de sulfetos, foram processados com o uso do módulo FRACLAC (Karperien, 2013) e do *software ImageJ* (Schindelin et al. 2012). Foram analisadas células com tamanho mínimo de 10 *pixels*, aumentadas gradativamente em 20 vezes, até um tamanho máximo que englobou 60% da imagem. Foram utilizados momentos (Q's) variando entre 10 e -10, em incrementos de 0,5, para capturar o comportamento das distribuições de valores extremos, tanto altos como baixos.

## 5. RESULTADOS EM ESCALA REGIONAL

### 5.1. ANÁLISE FRACTAL DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS DEPÓSITOS

Os resultados foram dispostos em gráficos log-log (Figura 5.1). A tabela 3 apresenta um resumo dos valores obtidos para as dimensões fractais em diferentes escalas, bem como os pontos de quebra onde ocorrem variações na dimensão fractal das distribuições. Estes resultados serão melhor discutidos nas seções posteriores.



**Fig. 5.1.** Resultados da análise fractal da distribuição dos depósitos nas quatro áreas de estudo, exibidos em gráficos log-log. As linhas de tendência azuis representam a escala local, as laranjas a escala distrital e as cinzas a escala regional. Ver texto e tabela para descrição dos detalhes.

**Tabela 3.** Resumo das dimensões fractais e pontos de quebra entre diferentes valores obtidos a partir das análises

	Norseman-Wiluna	Abitibi	Central Lapland	Rio das Velhas
Nº depósitos	308	133	41	57
$D_b$ Local	0,150	0,212	NA	0,108
Ponto de Quebra (Local-Distrital)	4 km	3 km	NA	2,2 km
$D_b$ Distrital	0,389	0,577	0,664	0,627
Ponto de Quebra (Distrital-Regional)	27 km	NA	32 km	10 km
$D_b$ Regional	1,337	NA	1,769	1,389
$D_{b(máx)}$ Lineamentos (Todos)	1,392	1,360	1,408	1,387
$D_{b(máx)}$ Lineamentos (Favoráveis)	1,358	1,316	1,445	1,392
$D_{b(máx)}$ Interseções	0,509	0,484	0,464	0,542

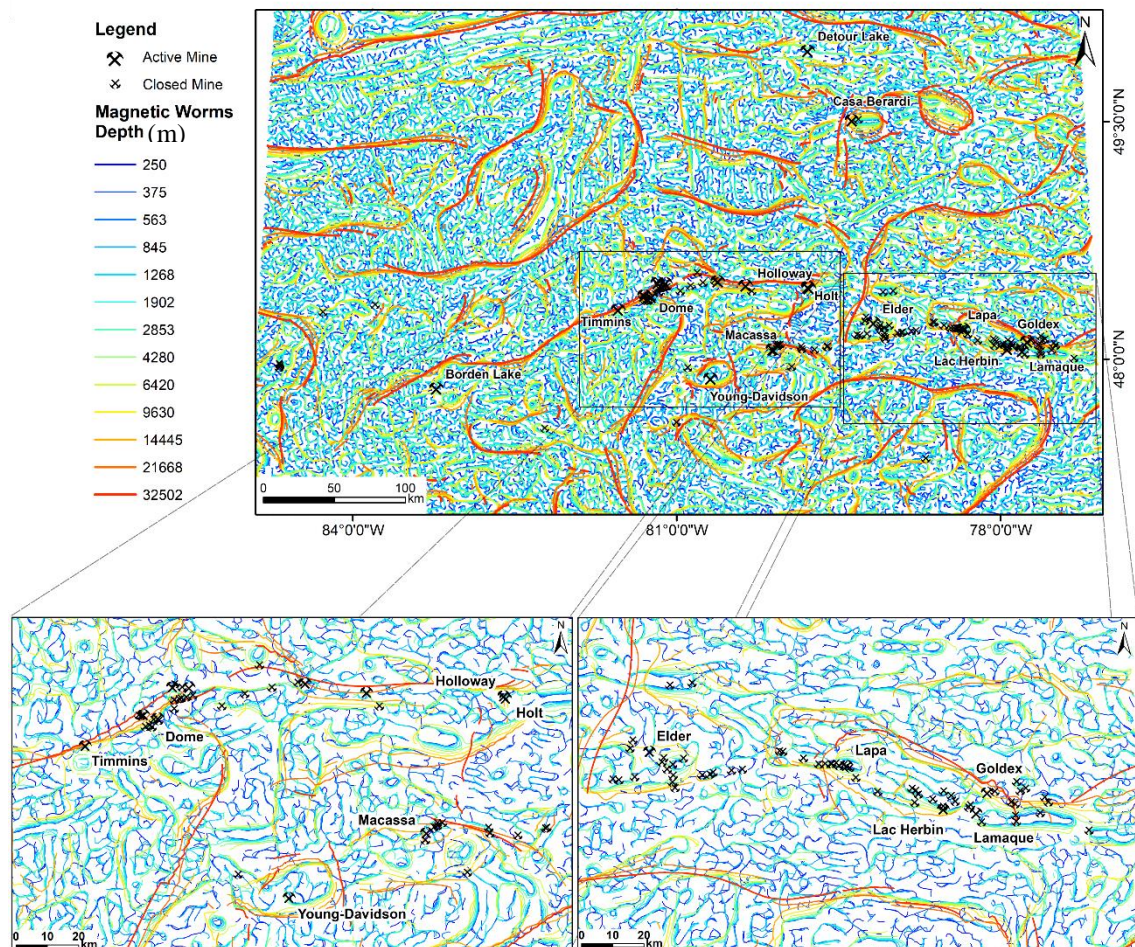
A partir dos resultados das análises, observa-se que os *greenstones Norseman-Wiluna* e Rio das Velhas apresentam três valores de dimensões fractais, de acordo com a escala de observação. Este resultado é consistente com o trabalho de (Haddad-Martim et al., 2017), que encontraram a mesma relação para os depósitos de tipo IOCG de Carajás. Já as regiões de *Central Lapland* e *Abitibi* exibiram padrões com dois valores de dimensão fractal. Esta característica também já foi reportada por diversos autores (Lisitsin, 2015; Raines, 2008; Sun et al., 2019).

## 5.2. MAPAS DE “WORMS” MAGNÉTICAS

A análise dos mapas de *worms* magnéticas permite observar a relação entre os locais de ocorrência dos depósitos e as estruturas magnéticas rasas e profundas. Para este estudo, estruturas entre 0,5 km a 9 km de profundidade foram consideradas rasas a intermediárias, e estruturas com mais de 15 km de profundidade foram consideradas profundas. Pode-se perceber que os depósitos de ouro estão normalmente relacionados a estruturas de profundidades rasas a intermediárias, que cortam estruturas profundas, ou diretamente relacionados a estruturas profundas (Figuras 5.2 a 5.5). Também existem agrupamentos de depósitos em regiões com estruturas profundas que cortam as estruturas principais paralelas aos orógenos. Apesar disto, nem todas as estruturas profundas apresentam relação com a ocorrência de depósitos.

### 5.2.1. GREENSTONE BELT ABITIBI

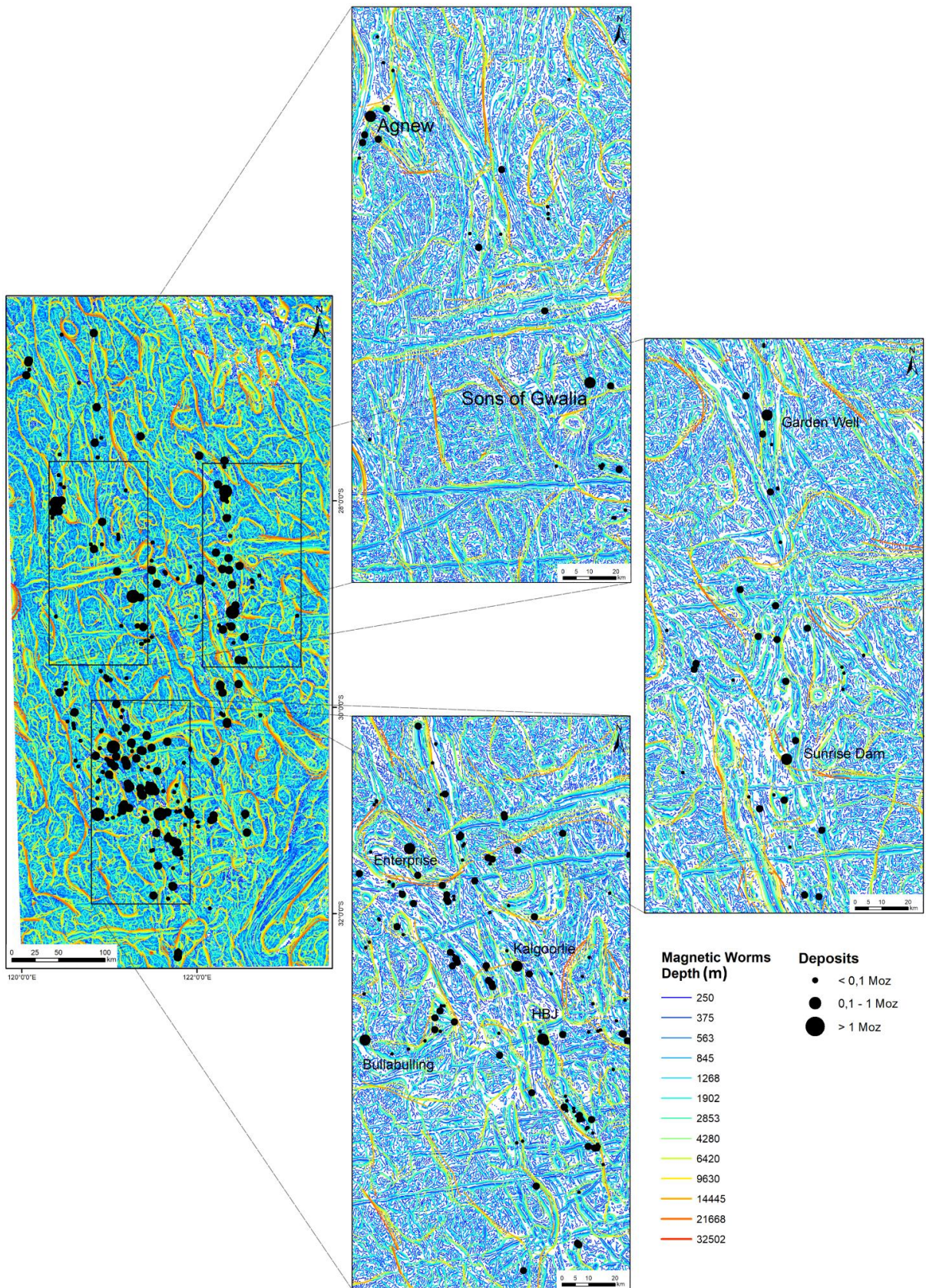
Os mapas de detecção de bordas multi-escala (“worms” magnéticas) da região de *Abitibi* são ilustrados na Figura 5.2. Nota-se uma clara relação dos depósitos com estruturas de profundidades rasas a intermediárias que cortam estruturas profundas (*Elder*, *Young-Davidson*) e também diretamente sobre estruturas profundas (*Timmins*, *Holloway*, *Lac Herbin*).



**Fig. 5.2.** Mapa de “worms” magnéticas na região do *greenstone belt* de *Abitibi* com a distribuição espacial dos depósitos estudados. Profundidades estimadas em metros.

### 5.2.2. GREENSTONE BELT NORSEMAN-WILUNA

A figura 5.3 exhibe os resultados da detecção de bordas multi-escala na região de *Norseman-Wiluna*. A densidade de linhas bastante superior em relação à região de *Abitibi* ocorre pela maior resolução das imagens aeromagnetométricas. Mesmo assim, observa-se que os depósitos minerais estão localizados em estruturas de baixa a média profundidade que interceptam estruturas profundas (*Sons of Gwalia, Enterprise*) ou apenas sobre estruturas profundas (*Sunrise Dam, Kalgoorlie*).

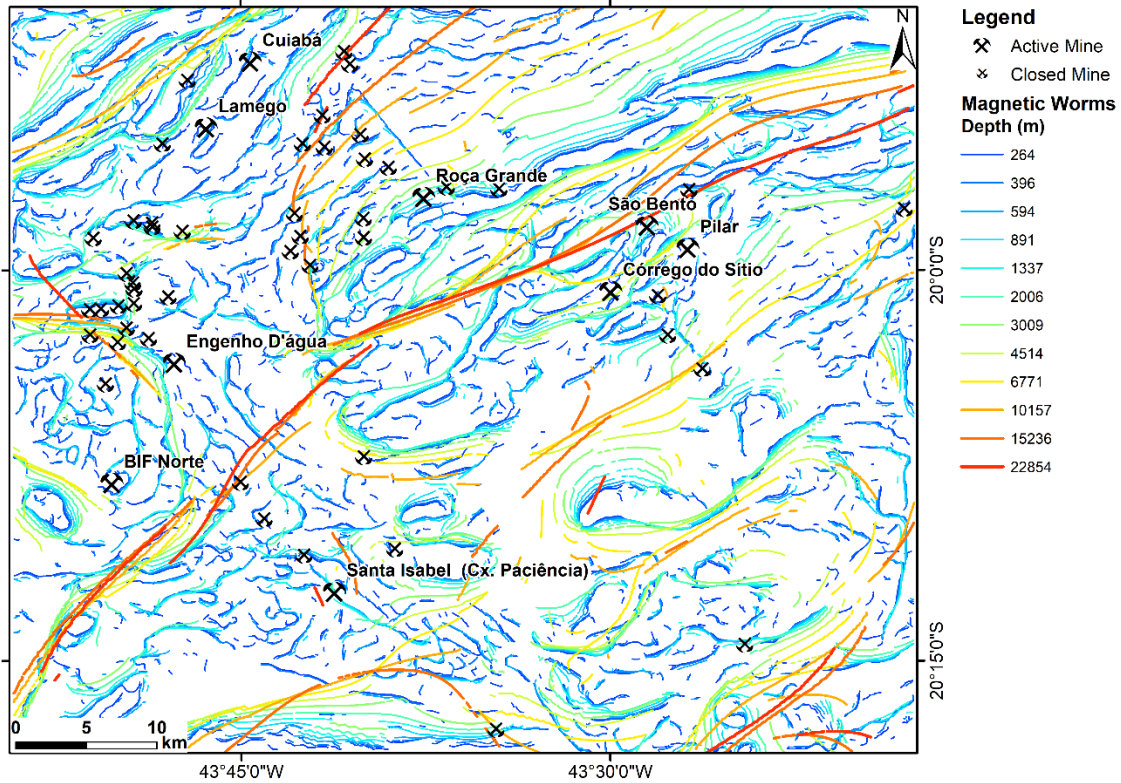


**Fig. 5.3.** Mapa de worms magnéticas da região do *greenstone belt Norseman-Wiluna* com a distribuição espacial dos depósitos estudados. Profundidades estimadas em metros.



### 5.2.3. GREENSTONE BELT RIO DAS VELHAS

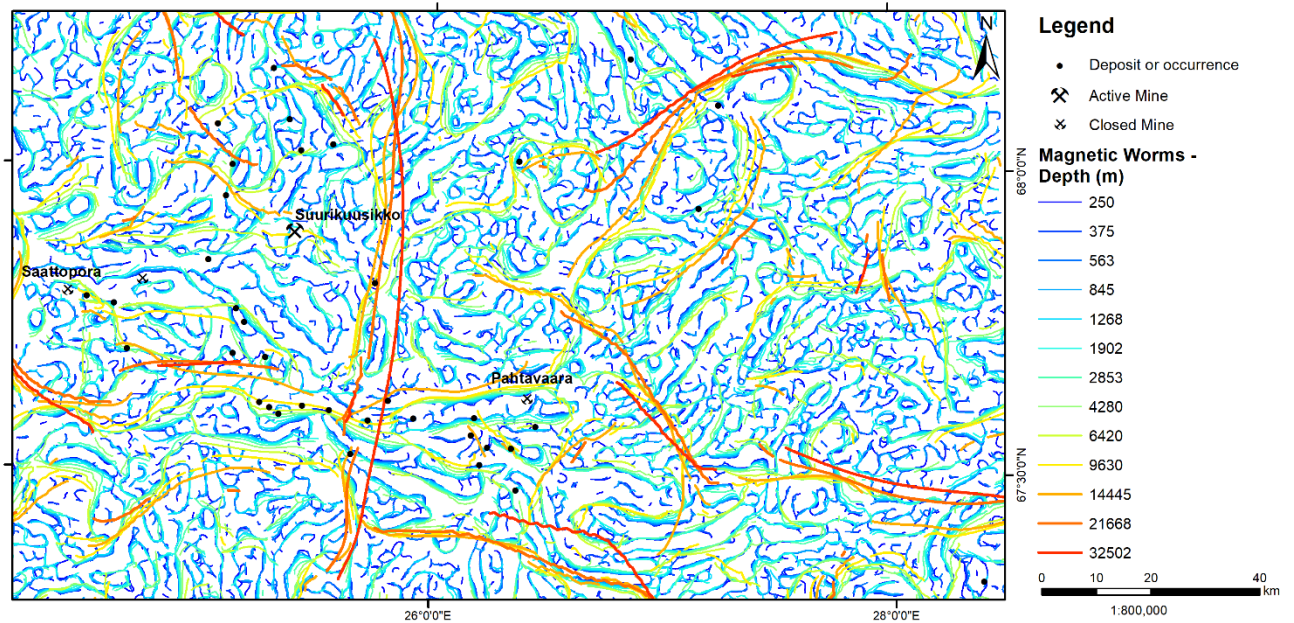
No *greenstone belt* Rio das Velhas, os depósitos ocorrem majoritariamente em estruturas rasas a intermediárias que seccionam estruturas profundas (Cuiabá, Lamego, Córrego do Sítio). Raros são os depósitos localizados diretamente sobre estruturas profundas (Roça Grande).



**Fig. 5.4.** Mapa de *worms* magnéticas da região do *greenstone belt* Rio das Velhas com a distribuição espacial dos depósitos estudados. Profundidades estimadas em metros.

### 5.2.4. GREENSTONE BELT CENTRAL LAPLAND

A região de *Central Lapland* também exibe uma relação similar ao *greenstone belt* Rio das Velhas. Os principais depósitos (*Suurikuusiko*, *Saattopora*) ocorrem em estruturas de segunda ordem, que interceptam estruturas profundas, apesar de também existirem ocorrências diretamente sobre estruturas profundas (*Pahtavaara*).



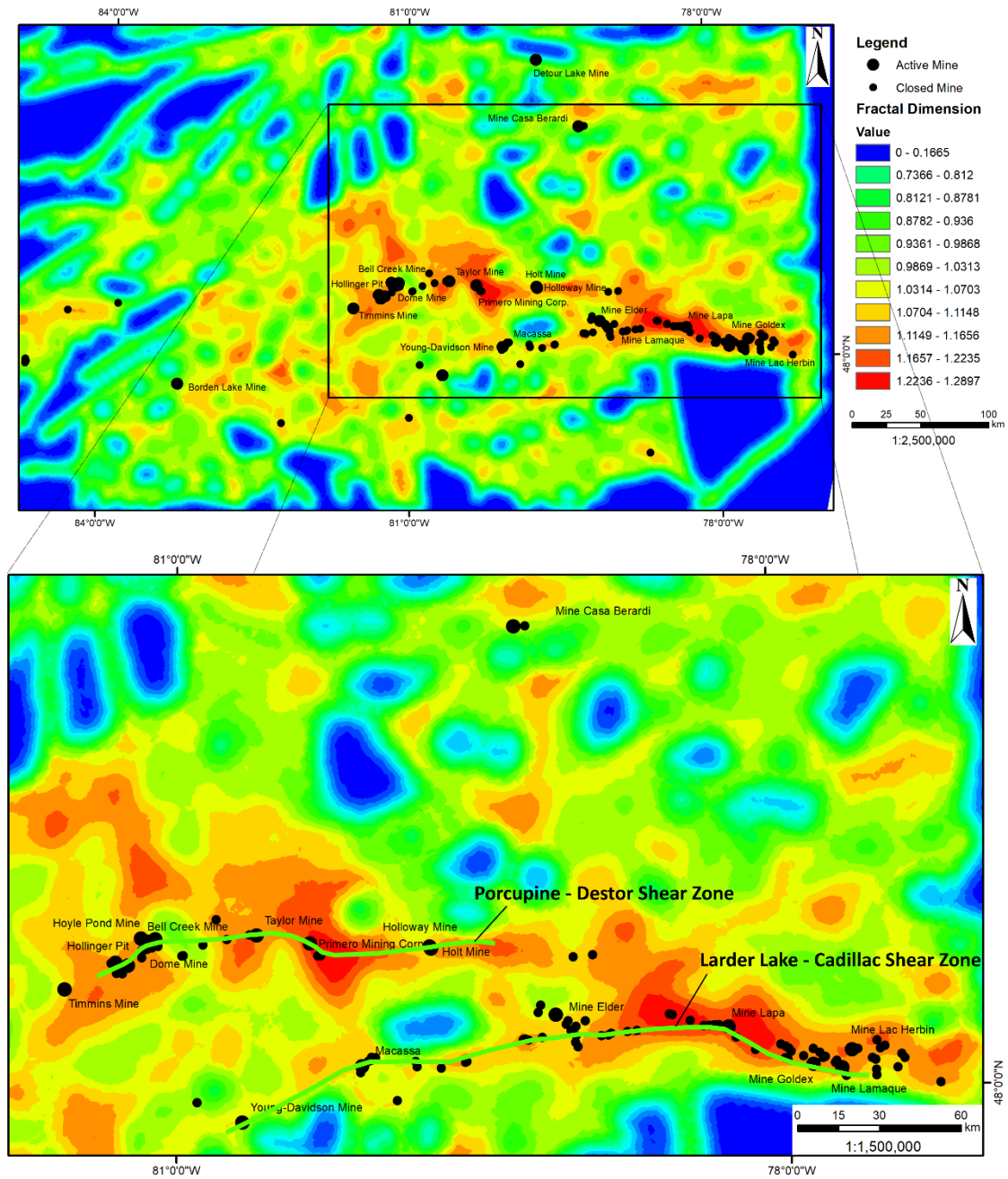
**Fig. 5.5.** Mapa de worms magnéticas da região do *greenstone belt* de *Central Lapland* com a distribuição espacial dos depósitos estudados. Profundidades estimadas em metros.

### 5.3. MAPAS DE DIMENSÕES FRACTAIS DE LINEAMENTOS MAGNÉTICOS

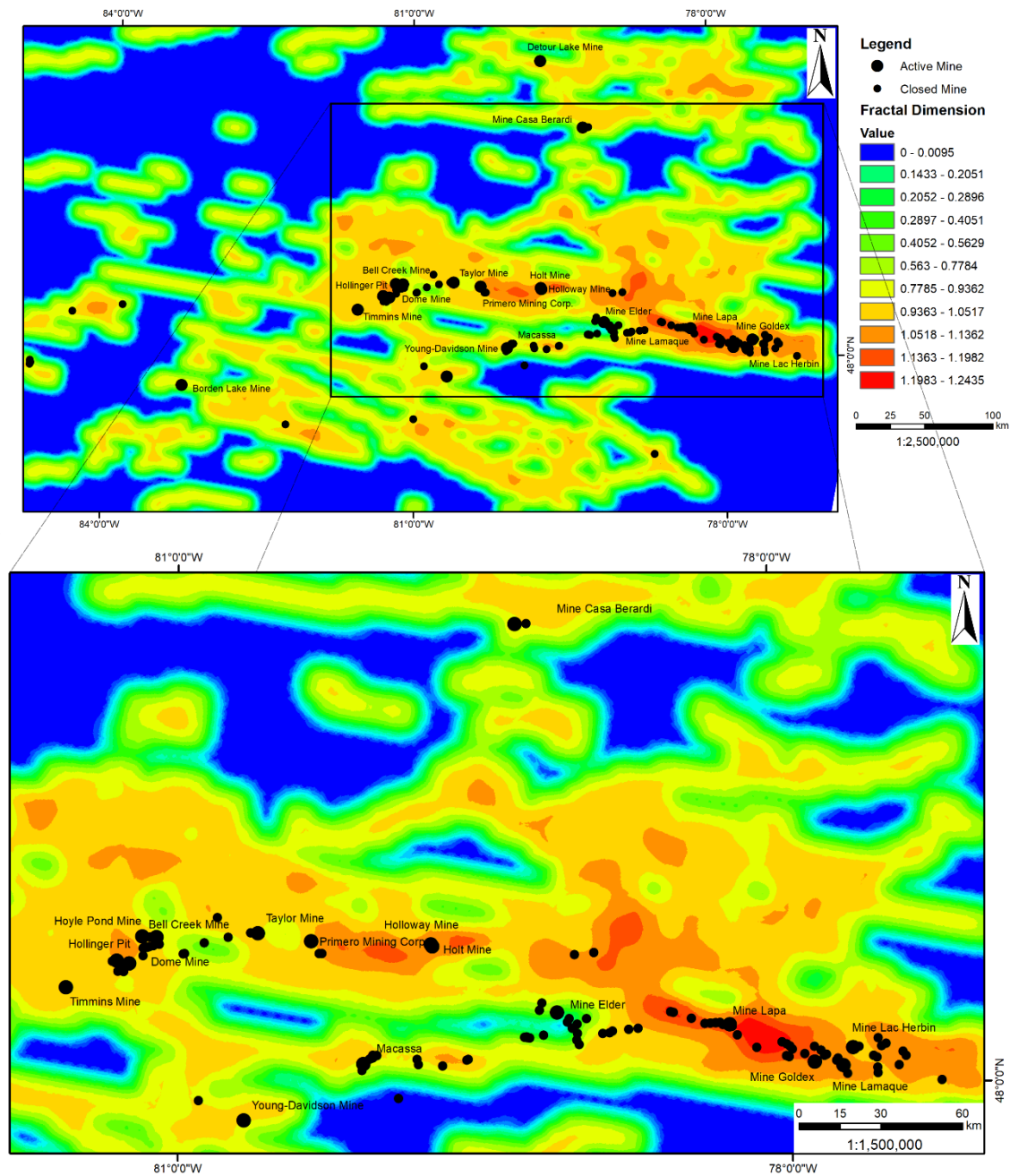
Foram desenvolvidos mapas das dimensões fractais da distribuição dos lineamentos magnéticos interpretados para cada área, suas interseções, bem como lineamentos filtrados nas direções reconhecidamente relacionadas às mineralizações. As direções utilizadas nos mapas com lineamentos favoráveis foram obtidas com dados da literatura (veja tabela 1 para referências). Por estarem diretamente relacionadas à capacidade de preenchimento do espaço das feições analisadas, as dimensões fractais de lineamentos magnéticos indicam sua densidade de distribuição espacial (Hodkiewicz et al., 2005). Uma maior densidade de lineamentos representa uma maior quantidade de estruturas e litologias magnéticas, o que representa áreas de maior permeabilidade e acumulação de fluidos, o que está relacionado à formação dos depósitos de ouro orogênico (Groves et al., 1998). Assim, espera-se que as regiões com maiores valores de dimensões fractais estejam relacionadas às mineralizações. A seguir, são apresentados os mapas de dimensões fractais para cada área estudada, juntamente com a distribuição dos depósitos minerais classificados por tamanho ou estágio de exploração.

#### 5.3.1. GREENSTONE BELT ABITIBI

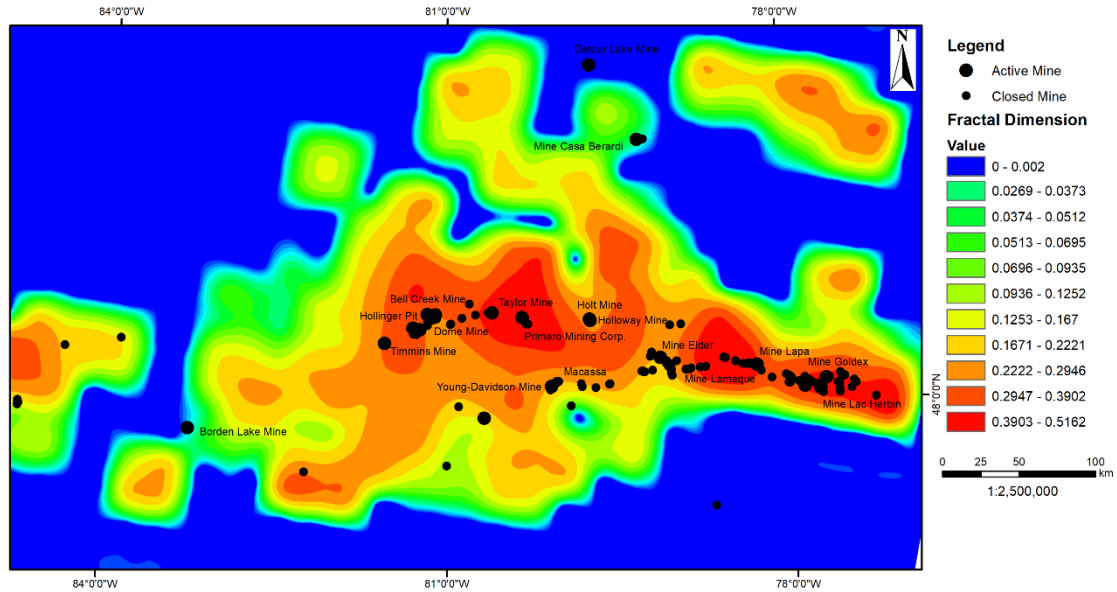
Para a região de Abitibi, além do mapa com todos os lineamentos (Fig. 5.6), foram selecionadas as direções entre WNW-ESE e NW-SE (Fig. 5.7). Nota-se uma melhor definição das áreas mineralizadas no mapa com os lineamentos filtrados. O mapa de análise das intersecções (Fig. 5.8) considera a intersecção de todos os lineamentos.



**Fig. 5.6.** Mapa de contornos das dimensões fractais de todos os lineamentos magnéticos na área do *greenstone belt Abitibi*, calculadas a partir de grade de células de 5 km de largura. As cores quentes indicam maiores dimensões fractais (i.e. maior densidade de estruturas). Os círculos pretos indicam as localizações dos depósitos ouro orogênico, sendo os maiores correspondentes a minas ativas. As linhas verdes mostram a localização dos perfis nas principais zonas de cisalhamento auríferas com a relação entre as dimensões fractais e a quantidade de ouro.



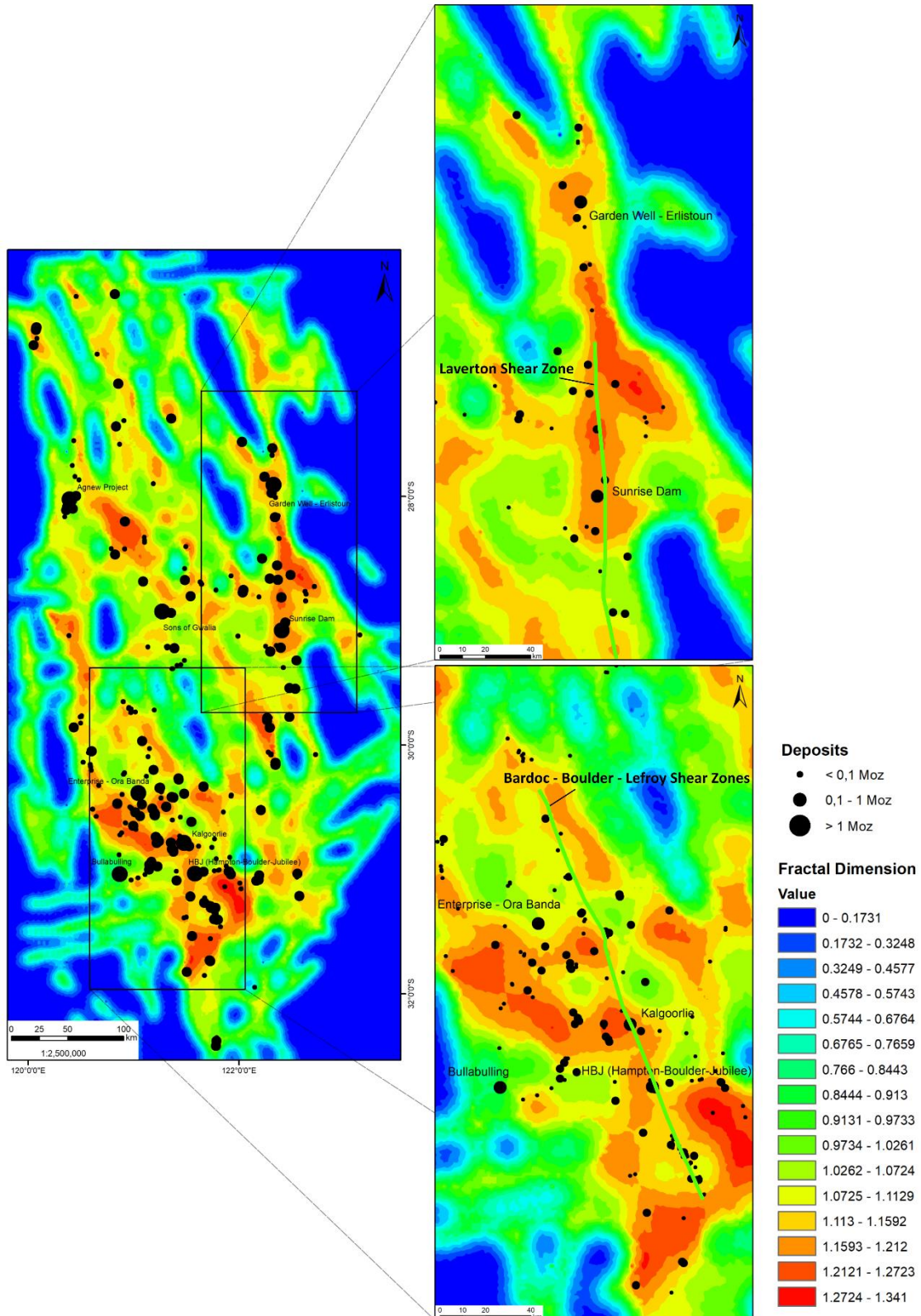
**Fig. 5.7.** Mapa de contornos das dimensões fractais dos lineamentos magnéticos filtrados nas direções favoráveis WNW-ESE e NW-SE (referências na tabela 1) calculadas a partir de grade de células de 5 km de largura. As cores quentes indicam maiores dimensões fractais (i.e. maior densidade de estruturas). Os círculos pretos indicam as localizações dos depósitos ouro orogênico, sendo os maiores correspondentes a minas ativas. *Greenstone belt Abitibi*.



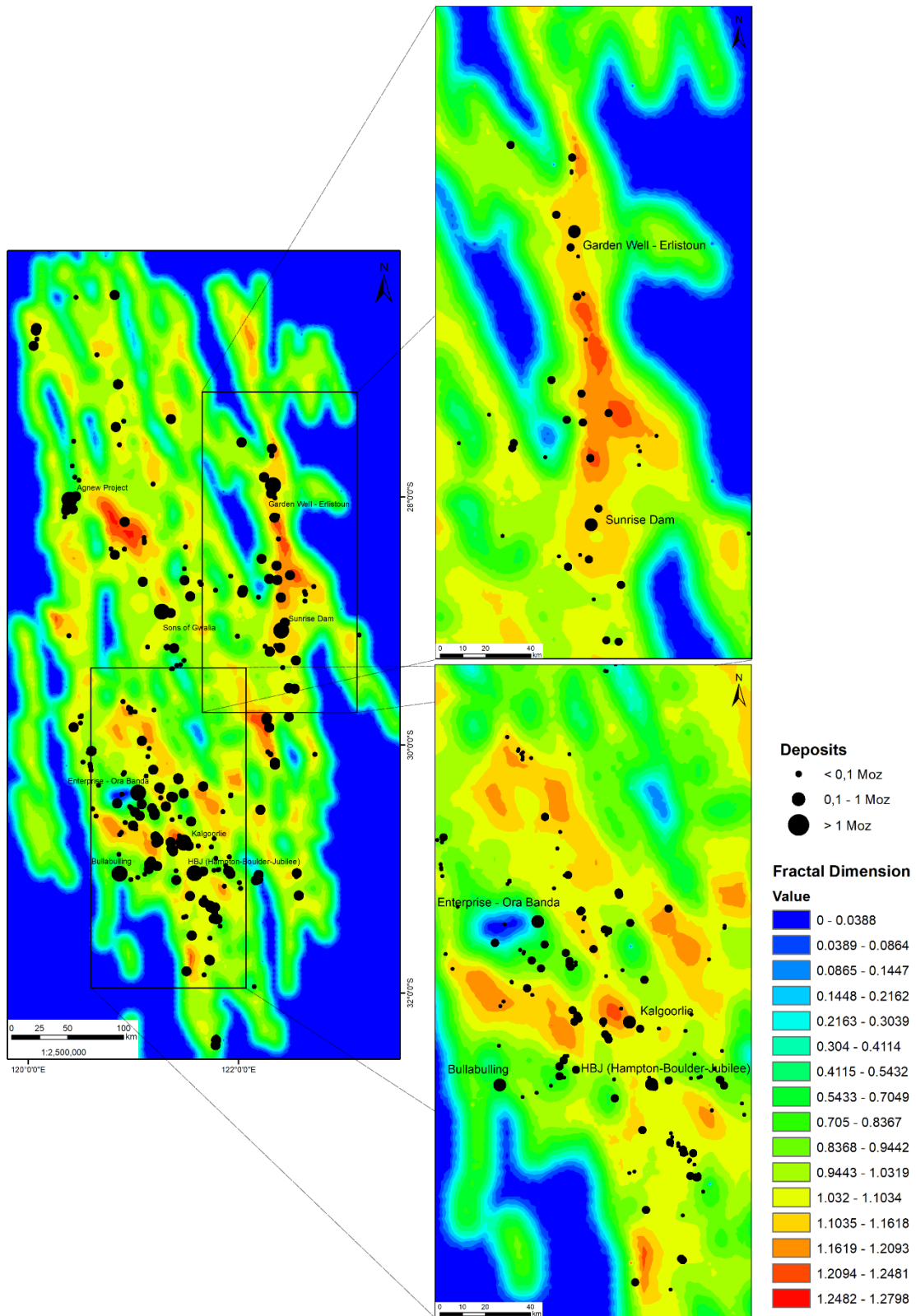
**Fig. 5.8.** Mapa de contornos das dimensões fractais das interseções de lineamentos magnéticos, calculadas a partir de grade de células de 20 km de largura. As cores quentes indicam maiores dimensões fractais (i.e. maior densidade de interseções). Os círculos pretos indicam as localizações dos depósitos ouro orogênico, sendo os maiores correspondentes a minas ativas. *Greenstone belt Abitibi.*

### 5.3.2. GREENSTONE BELT NORSEMAN-WILUNA

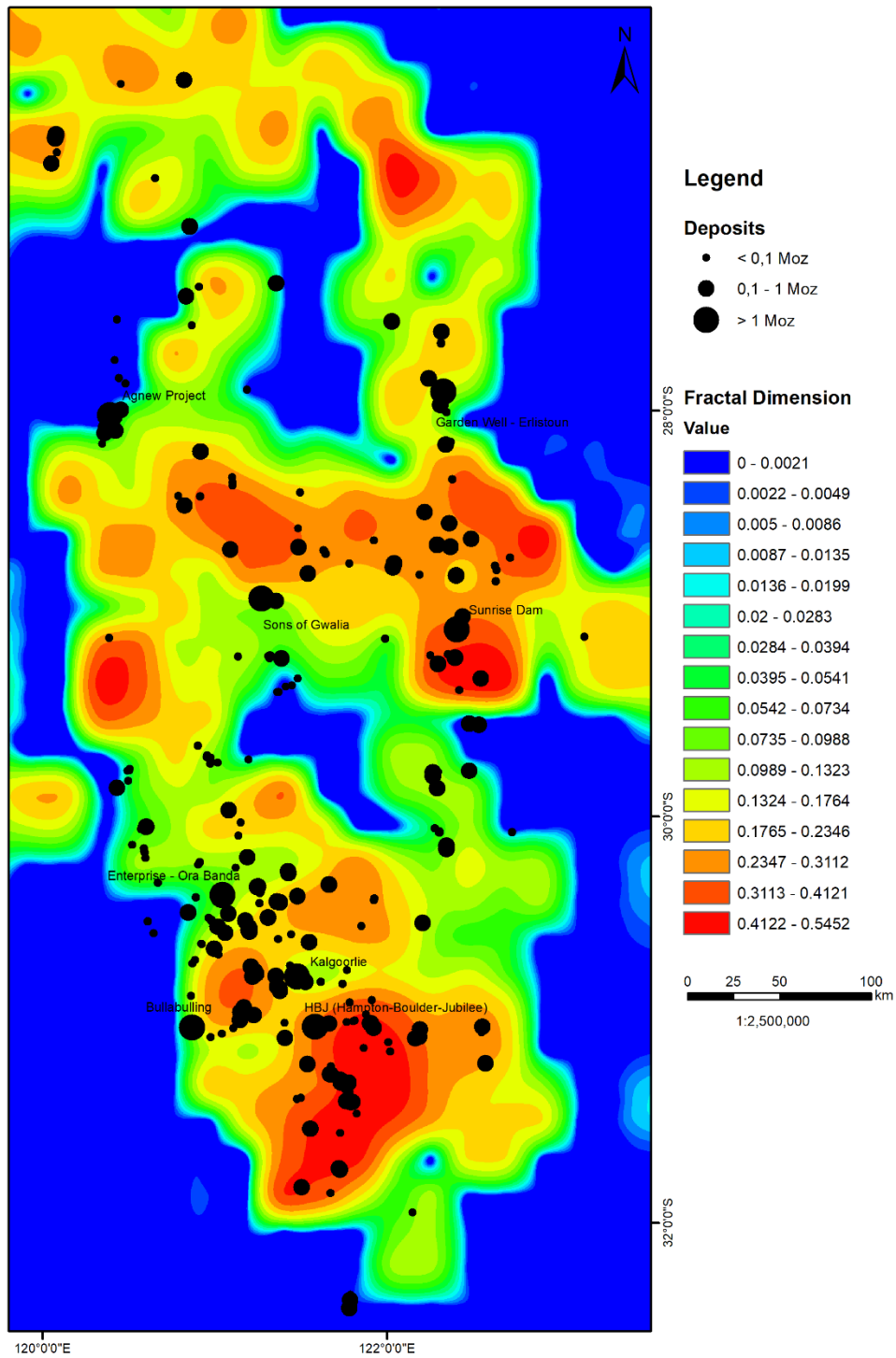
Na região de *Norseman-Wiluna*, além do mapa com a análise de todos os lineamentos magnéticos interpretados (Fig. 5.9), também foram analisadas somente as direções NNW-SSE e NW-SE (Fig 5.10). Da mesma forma que em *Abitibi*, nota-se uma melhor definição das áreas relacionadas aos depósitos. O mapa de interseções (Fig. 5.11) mostra a ocorrência dos depósitos em regiões com maiores valores, ou seja, com maior número de interseções.



**Fig. 5.9.** Mapa de contornos das dimensões fractais de todos os lineamentos magnéticos na área do *greenstone belt Norseman-Wiluna*, calculadas a partir de grade de células de 5 km de largura. As cores quentes indicam maiores dimensões fractais (i.e. maior densidade de estruturas). Os círculos pretos indicam as localizações dos depósitos ouro orogênico, com tamanho proporcional à quantidade de ouro. As linhas verdes mostram a localização dos perfis nas principais zonas de cisalhamento auríferas com a relação entre as dimensões fractais e a quantidade de ouro.



**Fig. 5.10.** Mapa de contornos das dimensões fractais dos lineamentos magnéticos filtrados nas direções favoráveis NNW-SSE e NW-SE (de acordo com referências da tabela 1) calculadas a partir de grade de células de 5 km de largura. As cores quentes indicam maiores dimensões fractais (i.e. maior densidade de estruturas). Os círculos pretos indicam as localizações dos depósitos ouro orogênico, com tamanho proporcional à quantidade de ouro. *Greenstone belt Norseman-Wiluna*.

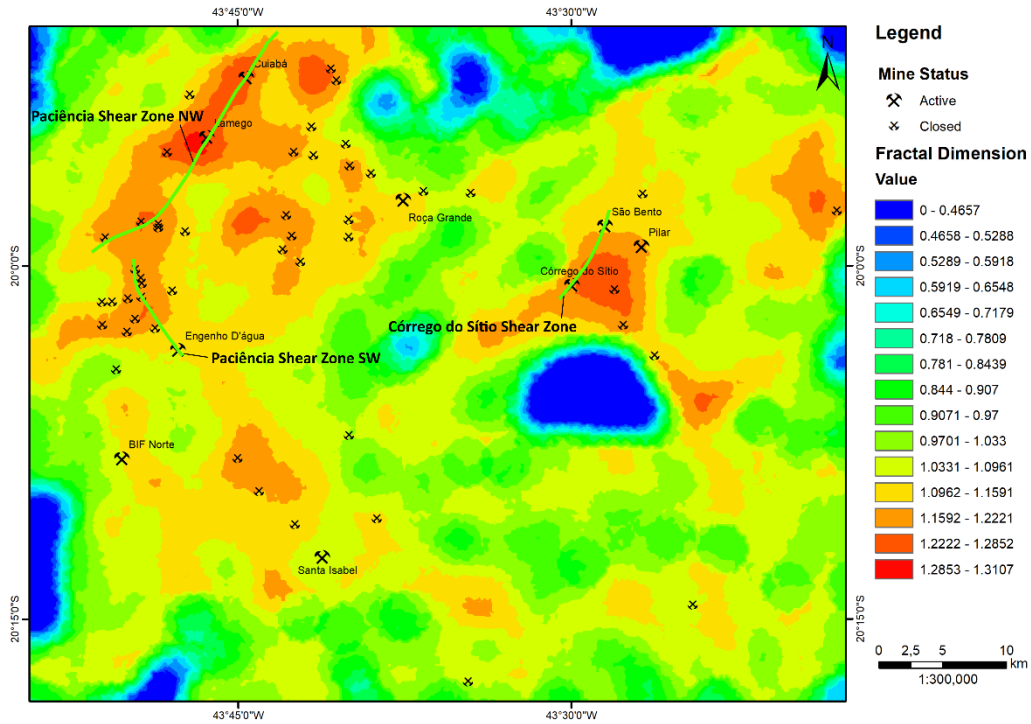


**Fig. 5.11.** Mapa de contornos das dimensões fractais das interseções de lineamentos magnéticos, calculadas a partir de grade de células de 20 km de largura. As cores quentes indicam maiores dimensões fractais (i.e. maior densidade de interseções). Os círculos pretos indicam as localizações dos depósitos ouro orogênico no *greenstone belt Norseman-Wiluna*.

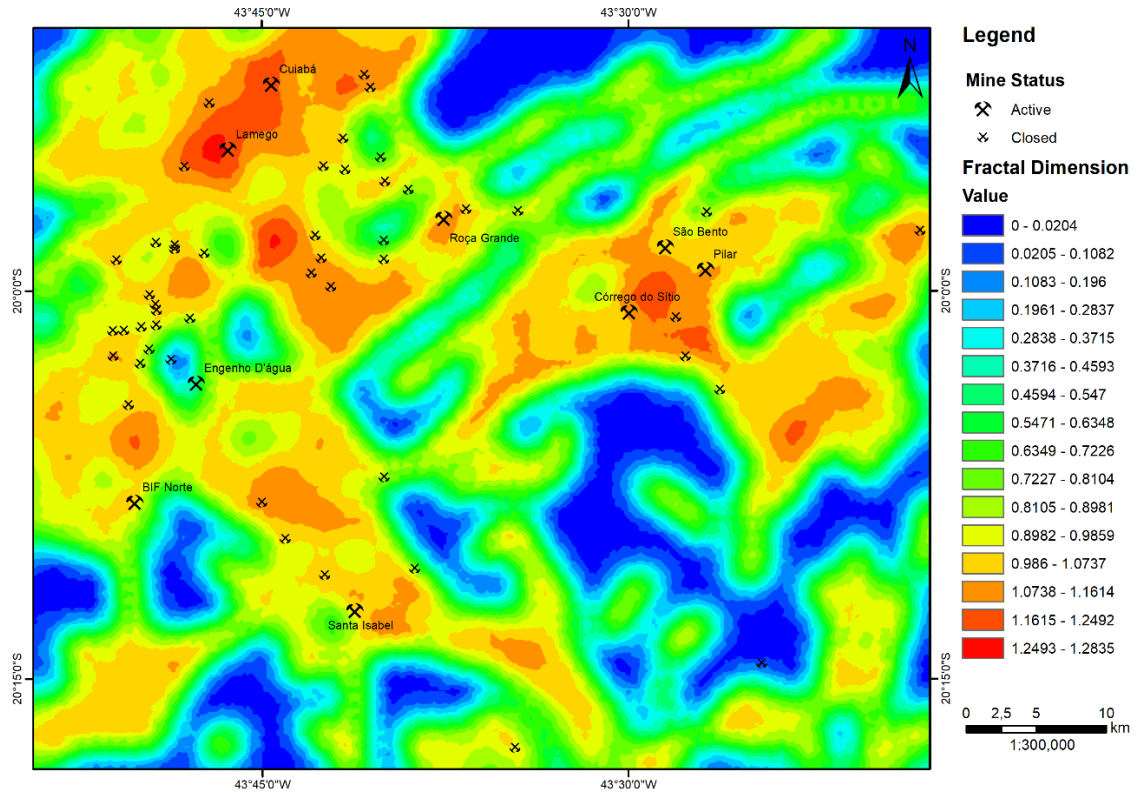


### 5.3.3. GREENSTONE BELT RIO DAS VELHAS

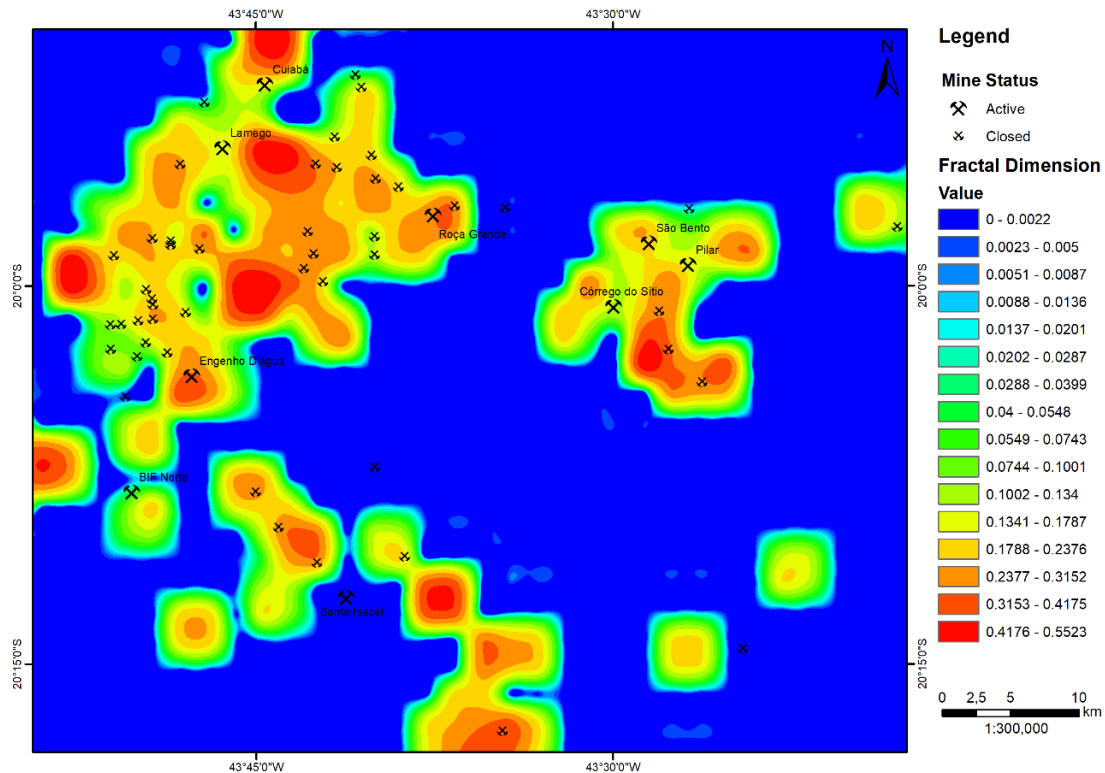
A figura 5.12 exibe o mapa com o resultado da análise de todos os lineamentos magnéticos mapeados no *greenstone belt* Rio das Velhas (GBRV). Lineamentos magnéticos das direções NW-SE, NE-SW e N-S foram utilizados para a geração do mapa de complexidade da figura 5.13. O resultado da análise das interseções destes lineamentos consta da figura 5.14.



**Fig. 5.12.** Mapa de contornos das dimensões fractais de todos os lineamentos magnéticos na área do *greenstone belt* Rio das Velhas, calculadas a partir de grade de células de 1 km de largura. As cores quentes indicam maiores dimensões fractais (i.e. maior densidade de estruturas). Os martelos cruzados para cima e para baixo simbolizam as minas ativas e inativas, respectivamente. As linhas verdes mostram a localização dos perfis nas principais zonas de cisalhamento auríferas com a relação entre as dimensões fractais e a quantidade de ouro.



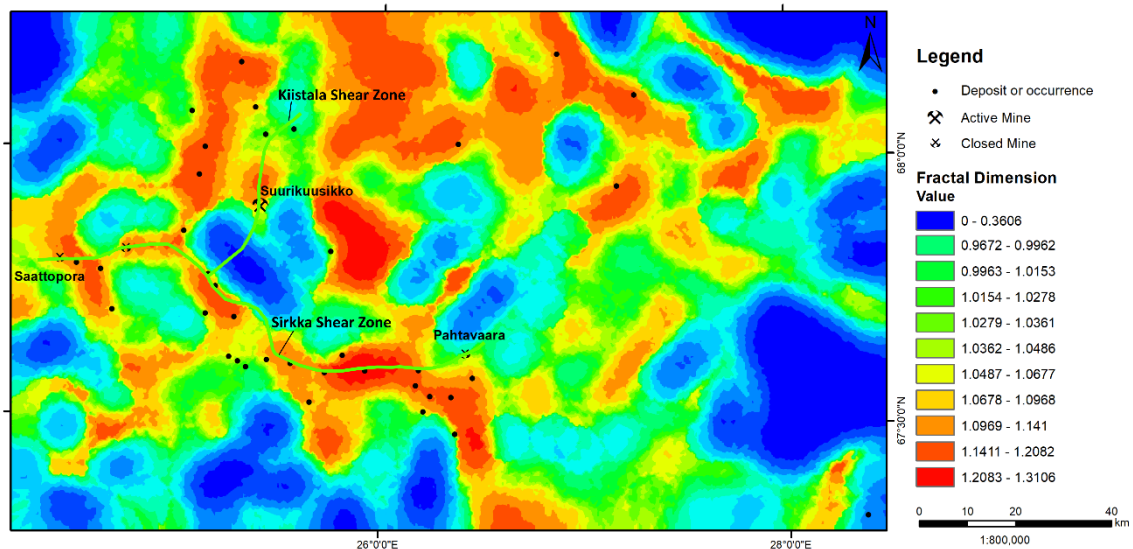
**Fig. 5.13.** Mapa de contornos das dimensões fractais dos lineamentos filtrados nas direções NW-SE, NE-SW e N-S (conforme referências na tabela 1) no *greenstone belt* Rio das Velhas, calculadas a partir de grade de células de 1 km de largura. As cores quentes indicam maiores dimensões fractais (i.e. maior densidade de estruturas). Os martelos cruzados para cima e para baixo simbolizam as minas ativas e inativas, respectivamente.



**Fig. 5.14.** Mapa de contornos das dimensões fractais das interseções de lineamentos no GBRV, calculadas a partir de grade de células de 2 km de largura. As cores quentes indicam maiores dimensões fractais (i.e. maior densidade de interseções). Os martelos cruzados para cima e para baixo simbolizam as minas ativas e inativas, respectivamente.

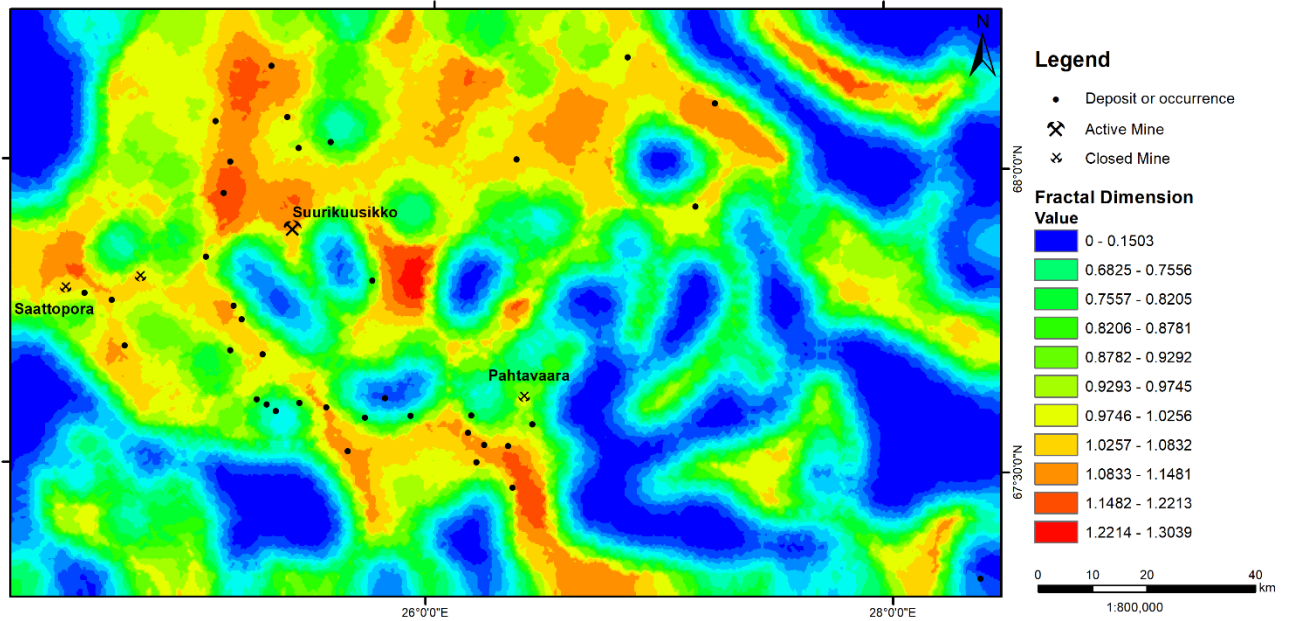
#### 5.3.4. GREENSTONE BELT CENTRAL LAPLAND

Em *Central Lapland*, a aplicação de filtro direcional nos lineamentos magnéticos também aprimorou a relação entre as ocorrências e as áreas com altos valores de dimensão fractal. Além da análise de todos os lineamentos magnéticos (Fig 5.15), foram também analisadas apenas as direções favoráveis NNW-SSE, NNE-SSW, N-S e WNW-ESE (Fig. 5.16), e as interseções de todos os lineamentos (Fig. 5.17).

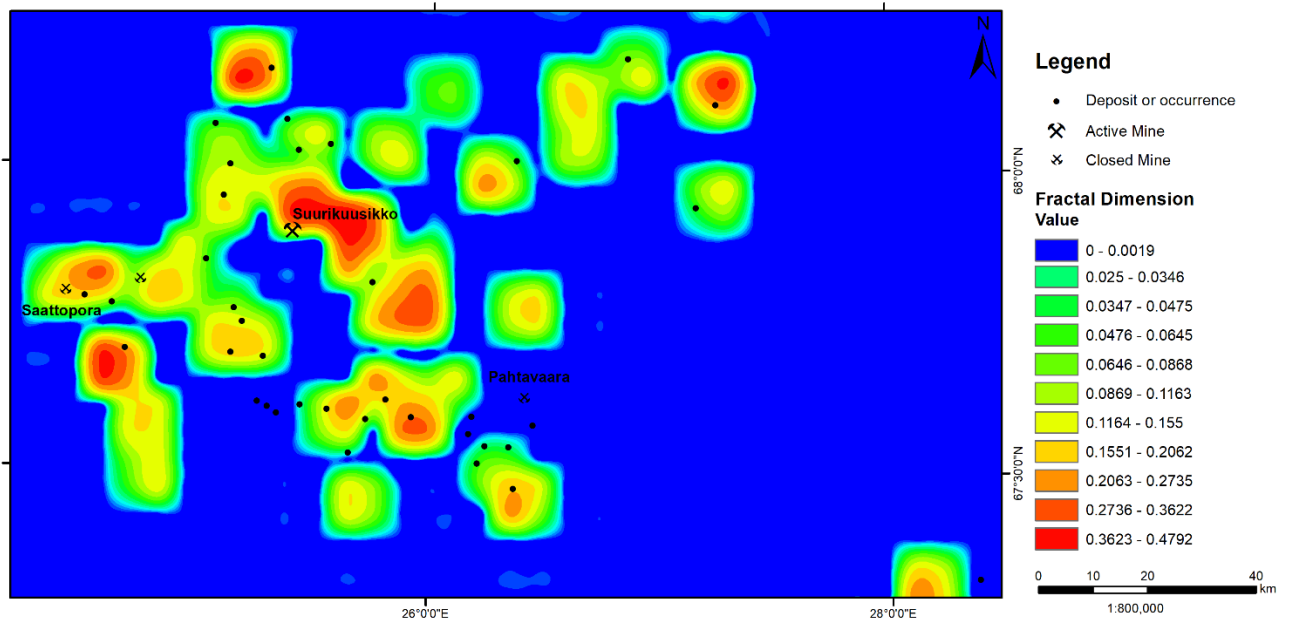


**Fig. 5.15.** Mapa de contornos das dimensões fractais de todos os lineamentos magnéticos na área do *greenstone belt Central Lapland*, calculadas a partir de grade de células de 2,5 km de largura. As cores quentes indicam maiores dimensões fractais

(i.e. maior densidade de estruturas). Os martelos cruzados para cima e para baixo simbolizam as minas ativas e inativas, respectivamente. As linhas verdes mostram a localização dos perfis nas principais zonas de cisalhamento auríferas com a relação entre as dimensões fractais e a quantidade de ouro.



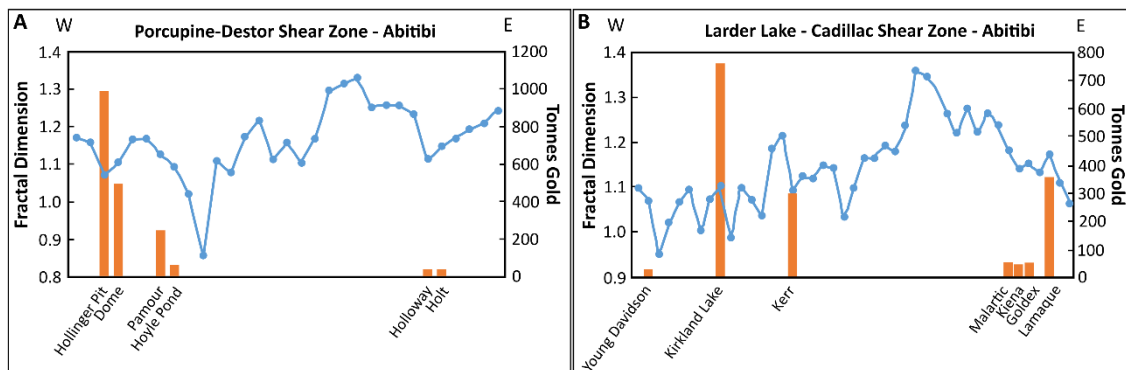
**Fig. 5.16.** Mapa de contornos das dimensões fractais dos lineamentos filtrados nas direções favoráveis NNW-SSE, NNE-SSW, N-S e WNW-ESE (conforme referências na tabela 1) no *greenstone belt Central Lapland*, calculadas a partir de grade de células de 2,5 km de largura. As cores quentes indicam maiores dimensões fractais (i.e. maior densidade de estruturas). Os martelos cruzados para cima e para baixo simbolizam as minas ativas e inativas, respectivamente.



**Fig. 5.17.** Mapa de contornos das dimensões fractais das interseções de lineamentos no *greenstone belt Central Lapland*, calculadas a partir de grade de células de 5 km de largura. As cores quentes indicam maiores dimensões fractais (i.e. maior densidade de interseções). Os martelos cruzados para cima e para baixo simbolizam as minas ativas e inativas, respectivamente.

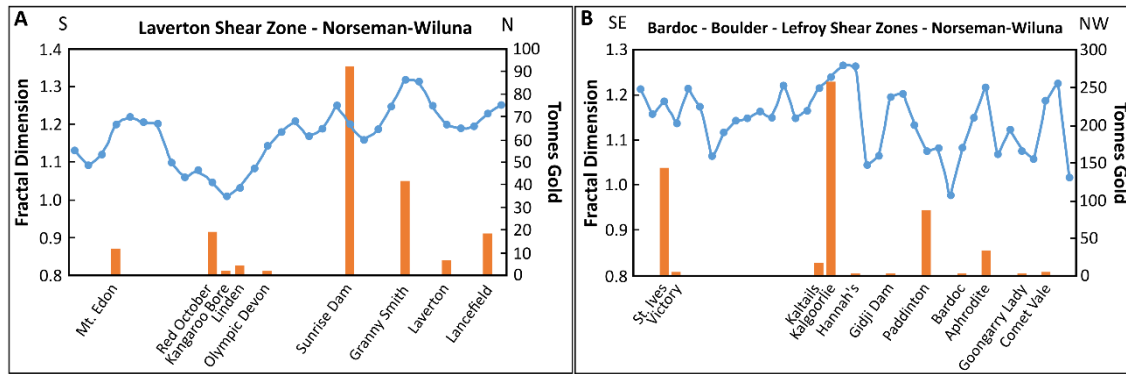
#### 5.4. PERFIS DE DIMENSÕES FRACTAIS E QUANTIDADE DE OURO

Para melhor definir a relação espacial entre os valores de dimensões fractais dos lineamentos magnéticos e a quantidade de ouro, estas variáveis foram colocadas em seções ao longo das principais zonas de cisalhamento de cada região. Estas zonas foram escolhidas pois concentram a maior quantidade de depósitos, e assim fornecem os locais ideais para observar estas relações espaciais. Em *Abitibi* foram traçadas duas seções, nas zonas de cisalhamento *Porcupine - Destor* e *Larder Lake - Cadillac* (Fig. 5.18), que englobam seis depósitos de classe mundial. No *greenstone belt Norseman-Wiluna* também foram analisadas duas seções, nas zonas de cisalhamento *Laverton* e *Bardoc - Boulder - Lefroy* (Fig. 5.19), com a presença de quatro depósitos de classe mundial. Três seções foram traçadas na região do GBRV devido à disposição regional dos depósitos, sendo duas no lineamento *Paciência* e uma no lineamento *Córrego do Sítio* (Fig. 5.20), com passagem por dois depósitos de classe mundial. Em *Central Lapland* foram definidas seções nas zonas de cisalhamento *Kiistala* e *Sirkka* (Fig. 5.21), com presença de um depósito com mais de 100 toneladas de recursos de ouro.



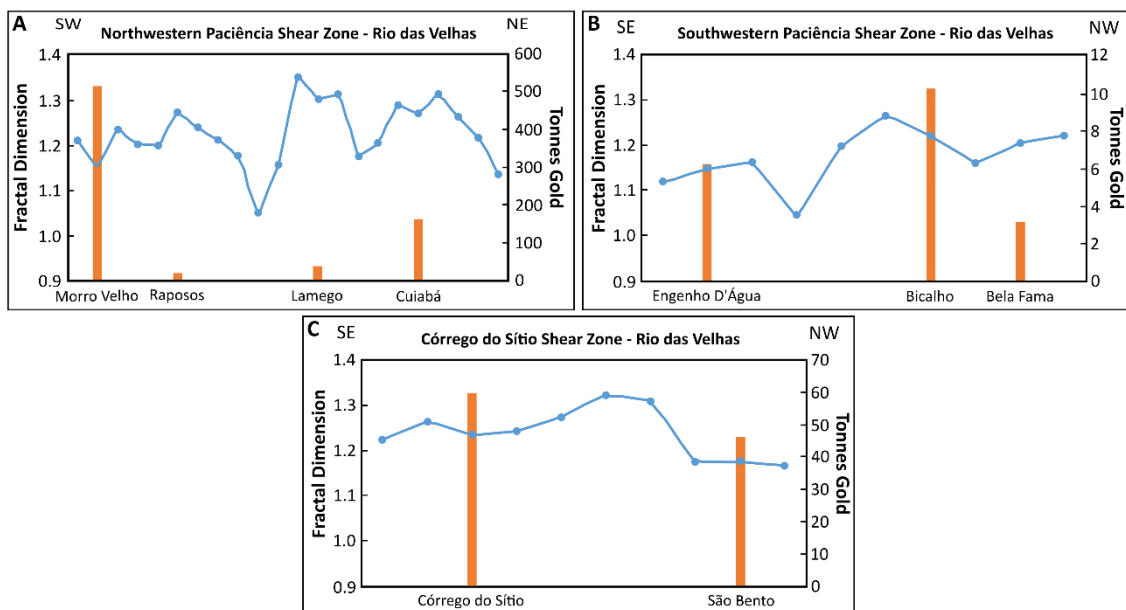
**Fig. 5.18.** Perfis demonstrando a relação entre a variação de dimensões fractais e a quantidade de ouro nas regiões das zonas de cisalhamento *Porcupine - Destor* (A) e *Larder Lake - Cadillac* (B), no *greenstone belt Abitibi*. Os perfis têm comprimento de ~150 km (A) e ~250 km (B). As toneladas de ouro foram obtidas a partir de Gosselin et al. (2005).

No geral, não há uma relação clara entre as dimensões fractais e a tonelagem dos depósitos de ouro. No entanto, na zona de cisalhamento *Porcupine - Destor* (Fig. 5.18A), os depósitos de *Pamour* e *Hoyle Pond* ocorrem no gradiente de dimensão fractal mais acentuado, que corresponde à transição entre as rochas metavulcânicas, com maior quantidade de feições magnéticas, e as rochas metassedimentares, mais homogêneas. No perfil da zona de cisalhamento *Larder Lake - Cadillac* (Fig. 5.18B), o depósito *Lamaque* também está localizado em uma porção com grande variação nos valores de dimensões fractais que, da mesma forma, também está relacionada à mesma variação litoestratigráfica.



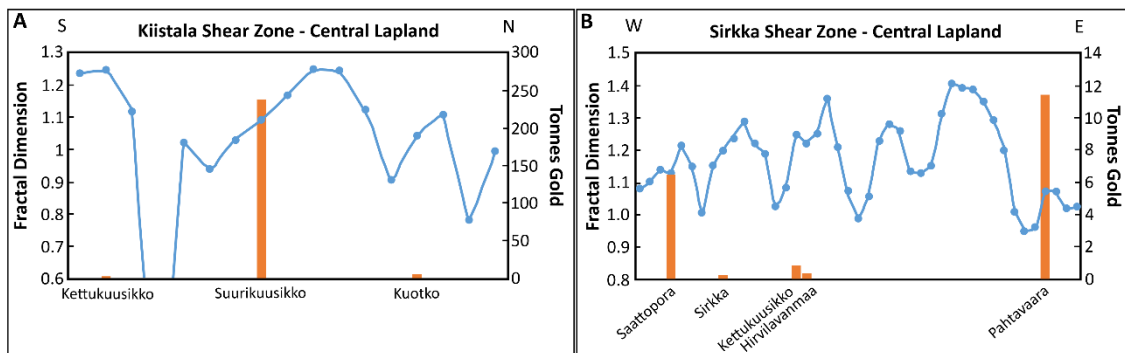
**Fig. 5.19.** Perfis exibindo a relação entre a variação de dimensões fractais e a quantidade de ouro nas regiões das zonas de cisalhamento *Laverton* (A) (~165 km) e *Bardoc – Boulder - Lefroy* (B) (~195 km), no *greenstone belt Norseman- Wiluna*. As toneladas de ouro de cada depósito correspondem à soma dos recursos da base de dados do *Geoscience Australia*.

Os depósitos de *Kalgoorlie* e *Granny Smith* estão associados aos maiores valores de dimensões fractais de suas respectivas seções (Figs 5.19A e B). Estão localizados em meio à sequência de rochas metavulcânicas com intercalações de formações ferríferas bandadas, mas também próximos à gradientes de variação significativos, juntamente com o depósito de *Paddinton*, sendo esta variação relacionada à transição das unidades anteriores com unidades metassedimentares e intrusões graníticas. No *greenstone belt* Rio das Velhas, apesar de não existirem relações muito evidentes entre a variação das dimensões fractais e a quantidade de ouro contida nos depósitos, o perfil com a porção noroeste do Lineamento Paciência (Fig. 5.20 A) mostra a localização do depósito de grande porte de *Lamego* após o gradiente mais acentuado de variação nas dimensões fractais dos lineamentos magnéticos. Ao analisar o mapa geológico desta área, observa-se que esta variação é causada pela transição entre duas unidades litológicas, uma metavulcanossedimentar e outra apenas metassedimentar, mas também pela ocorrência de estruturas oblíquas à direção principal nesta área.



**Fig. 5.20.** Perfis demonstrando a relação entre a variação de dimensões fractais e a quantidade de ouro nas regiões das zonas de cisalhamento Paciência (A e B) e Córrego do Sítio (C), no *greenstone belt* Rio das Velhas. Os perfis têm comprimento de ~23,5 km (A), ~8,5 km (B) e ~ 8 km (C). As quantidades de ouro foram obtidas a partir da base dados do Serviço Geológico do Brasil.

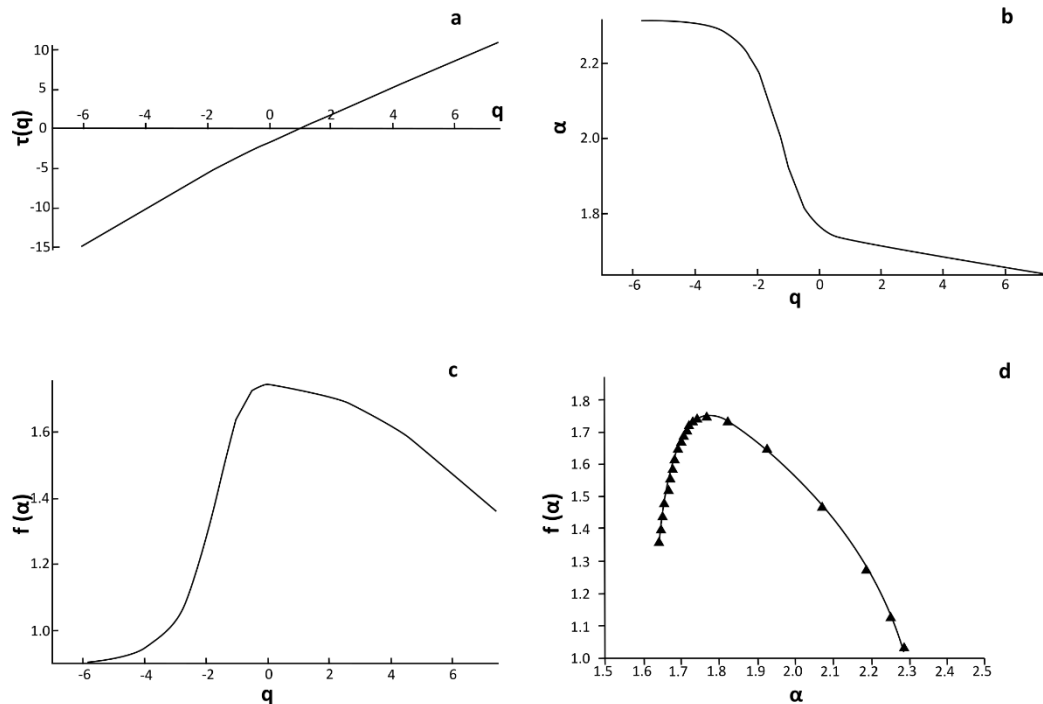
Na área de *Central Lapland*, o depósito de classe mundial de *Suurikuusikko* ocorre relacionado à uma variação gradual, mas grande magnitude, nas dimensões fractais (Fig. 5.21 A), o que não está, no entanto, condicionado por uma variação litológica. Isto leva a crer que a diferença na quantidade de lineamentos seja causada por fatores estruturais. Uma situação interessante ocorre com o depósito de *Kettukuusikko*, que se localiza na interseção das zonas de cisalhamento *Kiistala* e *Sirkka*, e, por isso, aparece nos dois perfis (Figs. 5.21 A e B). Nota-se que este depósito ocorre relacionado a gradientes acentuados em ambas as estruturas, sendo que no perfil N-S (Fig. 5.21 A) essa variação está associada à transição litológica abrupta causada pela zona de cisalhamento *Sirkka*, que sobrepõe as sequências metassedimentares e metavulcânicas. Já no perfil E-W (Fig. 5.21 B) a mudança nas dimensões fractais ocorre devido ao encontro com um outro conjunto de estruturas à oeste e à leste. O depósito de *Pahtavaara* situa-se próximo ao gradiente mais acentuado na zona de cisalhamento *Sirkka*. A transição entre uma sequência metavulcânica e outra metassedimentar mais homogênea parece condicionar a variação observada.



**Fig. 5.21.** Perfis com a relação entre a variação de dimensões fractais e a quantidade de ouro nas regiões das zonas de cisalhamento *Kiistala* (A) (~43 km) e *Sirkka* (B) (~110 km), no *greenstone belt Central Lapland*. As quantidades de ouro foram retiradas de Niiranen et al. (2015).

## 5.5. RESULTADOS DA ANÁLISE MULTIFRACTAL EM ESCALA REGIONAL

A figura 5.22 ilustra os gráficos obtidos a partir da análise multifractal dos lineamentos não filtrados do GBRV. Foram desenvolvidos gráficos similares para todas as áreas, em lineamentos filtrados e não filtrados. Através destes gráficos pode-se afirmar que todas as regiões apresentam lineamentos magnéticos com característica multifractal, em maior ou menor grau, devido à forma convexa das curvas do espectro (Zhao et al., 2011). Caso estas distribuições fossem fractais simples, as mesmas apareceriam como picos no gráfico. A tabela 4 exhibe os valores de  $\Delta\alpha$ ,  $\tau''(1)$  e  $\Delta f(\alpha)$  para cada uma das áreas. Com exceção da área de *Abitibi*, os valores de  $\Delta\alpha$  são maiores nos lineamentos filtrados (Figura 5.23). Os maiores valores foram obtidos para os lineamentos filtrados de *Norsema-Wiluna*, que também mostrou os maiores valores nos lineamentos totais. Os valores do índice  $\tau''(1)$  são todos negativos, reafirmando o caráter multifractal das distribuições dos lineamentos. Além disto, os valores mais negativos estão atribuídos aos lineamentos não filtrados, sendo os menores valores do *greenstone Norseman-Wiluna*, seguidos por *Abitibi*, Rio da Velhas e *Central Lapland*.



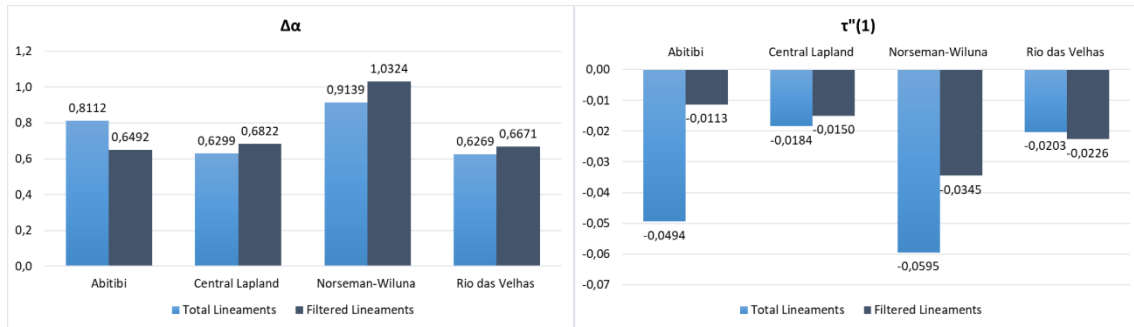
**Fig. 5.22.** Gráficos com os índices obtidos a partir da análise multifractal dos lineamentos magnéticos da área do GBRV. (a) Expoente de massa  $\tau(q)$  obtido através da inclinação das linhas do gráfico das funções de partição ( $x_q(\varepsilon)$  vs.  $q$ ). (b) Singularidade ( $\alpha$ ) calculada a partir de (A). (c) Espectro multifractal  $f(\alpha)$  calculado a partir de  $\tau(q)$ ,  $\alpha(q)$ , e  $q$ . (d) Espectro multifractal  $f(\alpha)$  vs singularidade  $\alpha$ , que apresenta uma função convexa inclinada à esquerda.

A análise do parâmetro  $\Delta f(\alpha)$ , indica a predominância de valores maiores ou menores nos dados (Zhao et al., 2011). Valores positivos correspondem à espectros multifractais com gancho para a direita e significam um predomínio de valores menores nos dados, ou seja, regiões com menor quantidade de lineamentos. Já valores negativos geram espectros com gancho para a esquerda e mostram maior quantidade de áreas com maiores valores, no caso, com maior quantidade de lineamentos. Assim, este índice tem relação com a densidade de lineamentos e pode ter relação com a favorabilidade de formação de depósitos minerais.

**Tabela 4.** Variação dos índices multifractais para cada área, para todos os lineamentos e para os lineamentos filtrados nas direções favoráveis

		$\Delta\alpha$	$\tau''(1)$	$\Delta f(\alpha)$
Todos os Lineamentos	Abitibi	0,8112	-0,0494	0,1270
	Central Lapland	0,6299	-0,0184	0,0482
	Norseman-Wiluna	0,9139	-0,0595	-0,3111
	Rio das Velhas	0,6269	-0,0203	-0,2946
Lineamentos Filtrados	Abitibi	0,6492	-0,0113	0,0413
	Central Lapland	0,6822	-0,0150	0,0387
	Norseman-Wiluna	1,0324	-0,0345	-0,2386
	Rio das Velhas	0,6671	-0,0226	0,0551





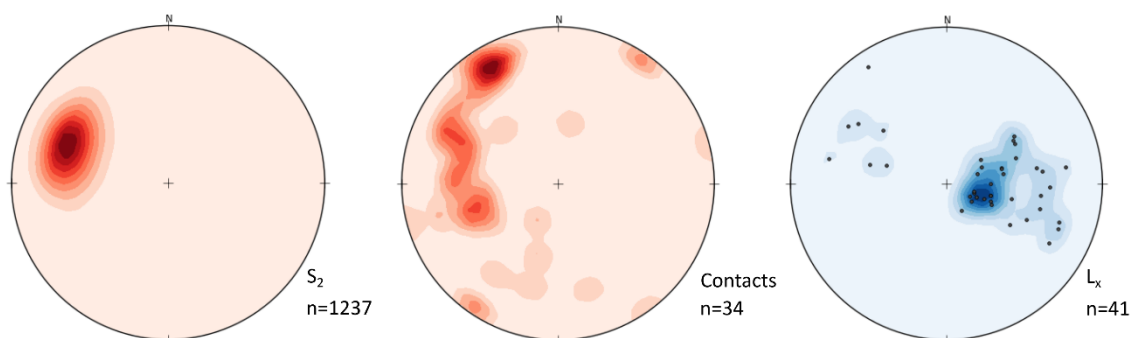
**Fig. 5.23.** Gráficos com o resumo dos índices  $\Delta\alpha$  e  $\tau''(1)$  do conjunto de mapas de lineamentos. Discussões sobre os resultados podem ser encontradas no texto.

## 5.6. RESULTADOS EM ESCALA LOCAL: ESTUDO DO LINEAMENTO CÓRREGO DO SÍTIO

Compondo o estudo da escala local, foram compilados dados de geologia estrutural das principais estruturas relacionadas às mineralizações obtidas na região do lineamento estrutural Córrego do Sítio. Também foi desenvolvida uma análise fractal da distribuição espacial dos depósitos e ocorrências relacionados à estas zonas de cisalhamento. Assim como para as escalas regional e microscópica, foram feitas análises multifractais destes lineamentos para verificar a existência de padrões multifractais nesta escala.

## 6. ANÁLISE ESTRUTURAL

Para uma melhor compreensão dos controles estruturais das mineralizações no Lineamento Córrego do Sítio, foram compiladas medidas estruturais dos bancos de dados da empresa AngloGold Ashanti Mineração Córrego do Sítio, obtidas em campanhas de sondagem e de campo. Foram selecionadas as foliações principais  $S_2$ , contatos entre litotipos e lineações de estiramento, já que é sabido que são as feições com relação direta com as mineralizações (Júnior et al., 2015; Pereira et al., 2013; Porto, 2008). As medidas estruturais foram lançadas em estereogramas com o uso do software *OpenStereo* (Grohmann & Campanha, 2011) (Figura 6.1).



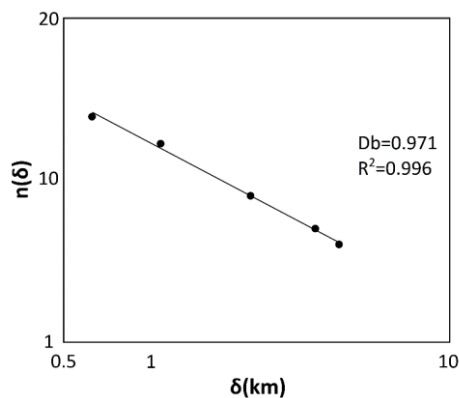
**Fig. 6.1.** Diagramas estruturais das principais estruturas relacionadas às mineralizações auríferas. A maioria corpos de minério no *greenstone belt* Rio das Velhas são posicionados ao longo das lineações de estiramento (Baltazar and Zucchetti, 2007; Lobato et al., 2001).

De acordo com os dados, a foliação principal  $S_2$  apresenta direção e mergulho bastante consistentes ao longo da área, se mantendo no quadrante nordeste com inclinação moderada a alta. Já os contatos variam mais, o que é esperado pois são afetados por dobras. Sua distribuição também se concentra no quadrante nordeste, mas tendendo a leste-nordeste, com variações para noroeste e oeste-noroeste. Seus mergulhos também são mais

variáveis, mas predominam inclinações médias a altas. As lineações de estiramento têm caimento predominante para leste-sudeste, com mergulho baixo a moderado. Trabalhos anteriores destacaram sua relação de paralelismo com a direção dos corpos mineralizados na área (Baltazar and Zucchetti, 2007; Lobato et al., 2001).

### 6.1. ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS DEPÓSITOS

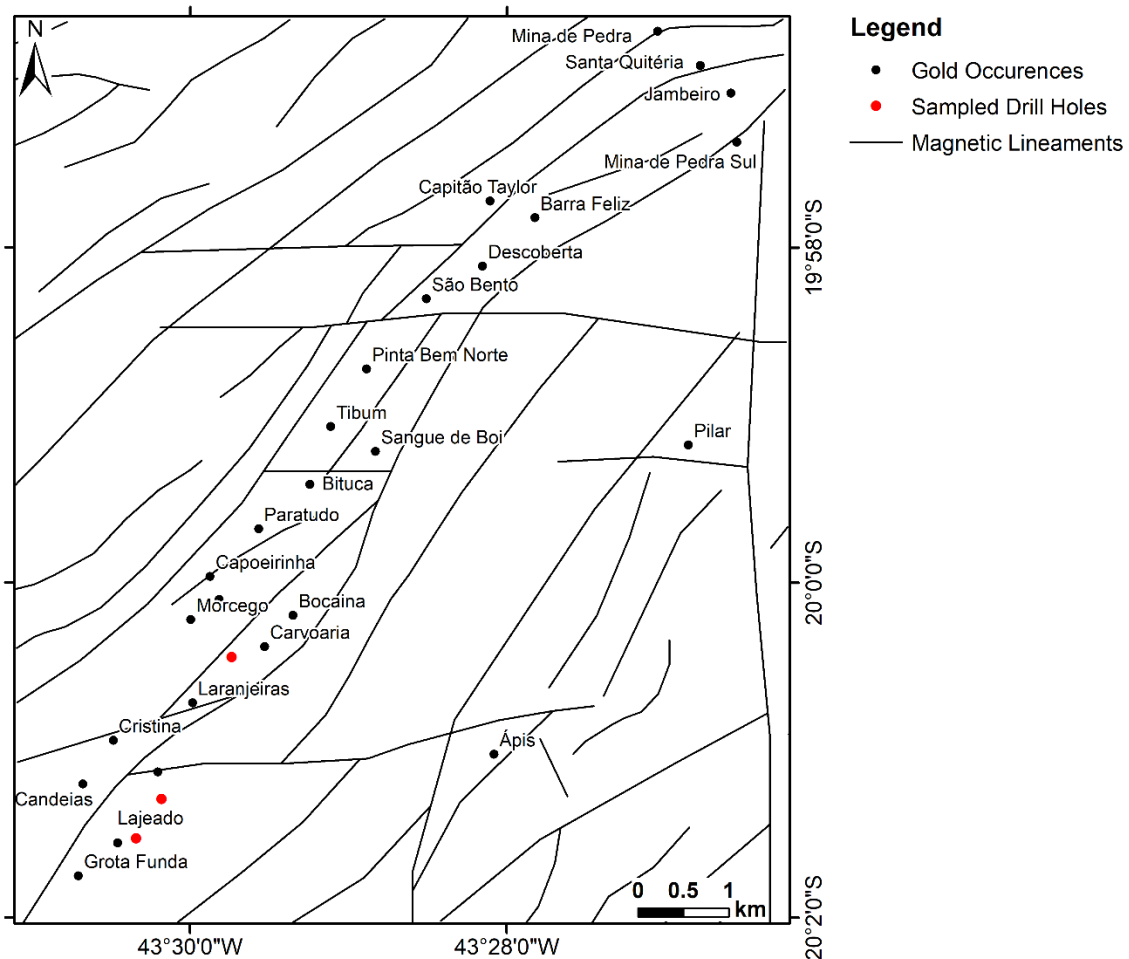
A análise fractal por *box-counting* da distribuição espacial dos depósitos forneceu uma linha reta no diagrama log-log, com regressão linear satisfatória que indicou  $R^2$  de 0.996, o que sugere que a distribuição das feições tem caráter fractal (Peternell and Kruhl, 2009). Foi obtido valor de dimensão fractal de 0.971 (Figura 6.2).



**Fig. 6.2.** Diagrama log-log com o resultado da análise por *box-counting* das ocorrências no Lineamento Córrego do Sítio.

### 6.2. ANÁLISE MULTIFRACTAL EM ESCALA LOCAL

A análise multifractal dos lineamentos magnéticos interpretados (Figura 6.3) para a região do lineamento Córrego do Sítio forneceu um espectro multifractal de formato convexo e  $\tau''(1)$  (índice de multifractalidade) menor que zero. Portanto, a análise indica que as feições apresentam distribuição multifractal. Os índices multifractais calculados a partir dos resultados apresentaram valores de  $\tau''(1)$  igual a -0,0334,  $\Delta(\alpha)$  igual a 0,623 e  $\Delta f(\alpha)$  equivalente a 0,1735.

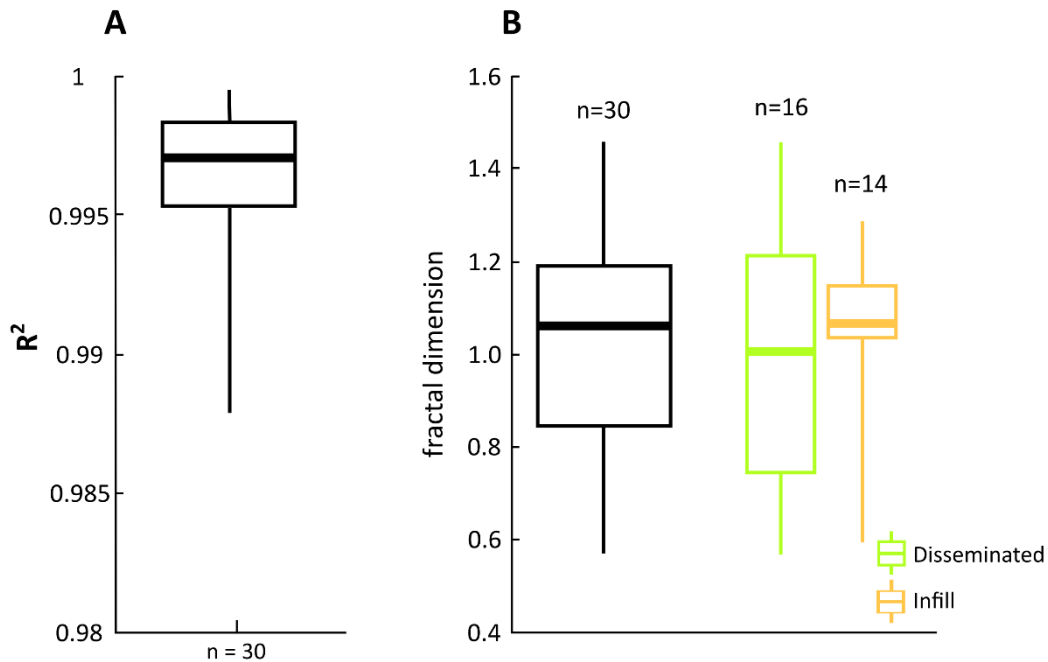


**Fig. 6.3.** Mapa com os lineamentos magnéticos e ocorrências de ouro analisados na área de estudo e a localização das sondagens amostradas para petrografia.

## 7. RESULTADOS EM MICROESCALA

### 7.1. ANÁLISE FRACTAL DAS FORMAS DOS GRÃOS DE SULFETOS

A análise da distribuição das formas dos grãos de sulfetos forneceu encaixes retilíneos nos gráficos log-log dos resultados do *box-counting*. Além disto, as regressões lineares indicaram valores de  $R^2$  superiores a 0,99 para a maioria das imagens (Figura 7.1A). De acordo com (Peternell and Kruhl, 2009), isto é importante para caracterizar a existência de geometria fractal nas distribuições. Assim, foi possível constatar que a distribuição espacial das mineralizações em lâmina é fractal. Todas as análises ( $n=30$ ) indicaram padrões monofractais (Figura 7.1B). Nota-se, no entanto, que os valores de dimensões fractais variam consideravelmente. Quando analisados separadamente, é possível observar diferenças entre as mineralizações disseminadas e venulares.



**Fig. 7.1.** A) *Box-plot* dos valores de  $R^2$  obtidos a partir das regressões lineares das análises fractais por *box-counting*; B) *Box-plots* das dimensões fractais das formas dos grãos de sulfetos, para todas as amostras, e separados por tipo de mineralização.

A tabela 5 traz um resumo de todos os valores das dimensões fractais calculadas para as formas dos grãos de sulfeto, para todas as amostras, e separadas em tipos disseminado e preenchimento de veios. Observa-se que mesmo dentro de um mesmo tipo de minério, as variações nos valores de dimensões fractais são substanciais. Isto é uma indicação de que as distribuições destes minerais pode ser multifractal (Munro et al., 2018), hipótese que foi atestada mais adiante, com a análise multifractal das formas dos minerais.

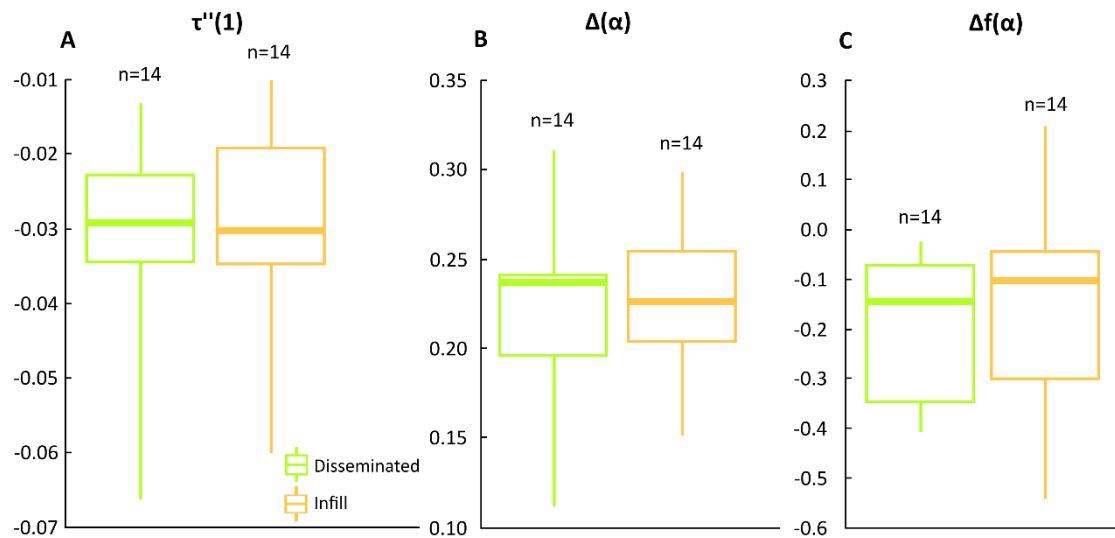
**Tabela 5.** Resumo das dimensões fractais obtidas em todos os mapas binários de minerais de minério

Analysis	Style	All	Disseminated	Infill
Grains Shapes Box-Counting	Range	0.57-1.46	0.57-1.46	0.59-1.29
	Median	1.06	1.01	1.06
	IQR	0.85-1.19	0.75-1.22	0.85-1.19

IQR = Interquatile range

## 7.2. ANÁLISE MULTIFRACTAL DAS FORMAS DOS GRÃOS DE SULFETOS

Os resultados das análises multifractais desenvolvidas nas formas dos grãos de sulfetos das 30 fotomicrografias indicam que 19 apresentam distribuição multifractal, e 11 são monofractais ou não fractais. Os índices multifractais  $\Delta\alpha$  (variação de singularidade),  $\tau''(1)$  (índice de multifractalidade) e  $\Delta f(\alpha)$  (variação de espectro multifractal) foram calculados para 28 das imagens binárias. Duas imagens não possuíam o mínimo de grãos necessários para a análise e foram descartadas. Foram analisadas as formas dos cristais de sulfetos e seus valores foram plotados em *box-plots* para melhor visualização (Figura 7.2). Os resultados, como nas análises fractais, foram separados por tipo de mineralização.



**Fig. 7.2.** Box-plots com os índices multifractais  $\tau''(1)$  (índice de multifractalidade),  $\Delta\alpha$  (variação de singularidade) e  $\Delta f(\alpha)$  (variação de espectro multifractal) calculados para as formas dos grãos de sulfeto.

Observa-se que os valores absolutos de  $\tau''(1)$  são mais negativos para as mineralizações disseminadas, apesar da mediana ser maior que as de preenchimento de veios. O mesmo ocorre com os valores de  $\Delta\alpha$ . A variação de espectro multifractal  $\Delta f(\alpha)$  é sempre negativa para o minério disseminado, enquanto para o preenchimento de veios há amostras positivas. Os valores mínimos e máximos, variação interquartis e medianas dos índices calculados, estão descritos na tabela 6.

**Tabela 6.** Valores dos índices multifractais  $\Delta\alpha$  (variação de singularidade),  $\tau''(1)$  (índice de multifractalidade) e  $\Delta f(\alpha)$  (variação de espectro multifractal) calculados para as formas dos grãos dos minerais de minério

Disseminated			
Index	$\tau''(1)$	$\Delta(\alpha)$	$\Delta f(\alpha)$
Range	-0.0663 to -0.013	0.1115 to 0.3107	-0.4099 to -0.0255
Median	-0.0293	0.2369	-0.1448
IQR	-0.0345 to -0.0228	0.1960 to 0.2408	-0.3466 to -0.0719
Infill			
Index	$\tau''(1)$	$\Delta(\alpha)$	$\Delta f(\alpha)$
Range	-0.0601 to -0.0086	0.1509 to 0.2982	-0.5432 to 0.2088
Median	-0.0301	0.2260	-0.1033
IQR	-0.0348 to -0.0191	0.2036 to 0.2533	-0.3004 to -0.0449

IQR: Interquartile range

## 8. DISCUSSÃO

### 8.1. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS DEPÓSITOS EM ESCALA REGIONAL

Ao analisar a distribuição espacial dos depósitos nas quatro províncias minerais sob estudo, constatou-se que todas apresentam característica fractal e não aleatória. Dimensões fractais distintas em escala local (<4 km), distrital (4 km a 30 km) e regional (>30 km) foram observadas em todas as áreas de estudo, com

exceção de *Central Lapland*. Isso indica a atuação de diferentes processos mineralizantes em cada uma destas escalas, eliminando-se a possibilidade de efeitos de sub-amostragem (*roll-off*) (Carranza, 2009). Os pontos de quebra entre as dimensões locais e distritais são bastante similares para os depósitos do Canadá, Austrália e Brasil, entre 2 km a 4 km. Nesta escala, ocorre a transição entre a ocorrência de processos em escala de depósito (intersecções entre falhas e anticlinais), e processos mais amplos (sistemas hidrotermais em escala crustal). A inexistência de uma dimensão fractal distinta abaixo de 4 km para a área da Finlândia pode ser devida ao relativo baixo grau de exploração desta região em comparação com as duas outras áreas. Isto aumenta possíveis efeitos de sub-amostragem (Blenkinsop and Sanderson, 1999), principalmente nas menores escalas, devido a não descoberta de possíveis ocorrências. Isto pode indicar um potencial para novas descobertas no entorno dos depósitos já conhecidos.

Para a escala regional, os pontos de quebra são próximos para os *greenstones Norseman-Wiluna* e *Central Lapland*, em aproximadamente 30 km, e estão na mesma ordem de grandeza da quebra do GBRV (10 km). Doure (2017) verificou que existe um padrão de distribuição de grupos de depósitos de ouro orogênico ao longo de zonas de cisalhamento, com espaçamento de 30 km entre si, compatível, portanto, com os valores aqui obtidos. Assim, estes resultados apontam para a ocorrência de processos em escala de arquitetura crustal, como falhas transcrustais e processos de enriquecimento e metassomatismo do manto sub-litosférico. Isto reforça a necessidade do entendimento destes sistemas nesta escala (Blewett et al., 2010; Gaboury, 2019; Groves et al., 2020).

A análise do espectro multifractal dos lineamentos magnéticos das quatro áreas mostrou que todas apresentam distribuições multifractais. Os valores de  $\Delta\alpha$  indicam um maior grau de multifractalidade para a região do *greenstone Norseman-Wiluna*, seguido por *Abitibi*, e depois *Central Lapland* e Rio das Velhas, com valores muito similares. Isto implica em maior irregularidade ou complexidade na disposição espacial dos lineamentos em cada área. Porém, esta diferença também pode ser relacionada à diferença na resolução dos aerolevantamentos de cada local. Da mesma forma que a análise fractal simples, maiores níveis de irregularidade ou complexidade estão relacionados a um maior potencial para mineralizações (Zhao et al., 2011). Os valores de  $\tau''(1)$  apresentaram os menores valores nas regiões de *Norseman-Wiluna* e *Abitibi*, o que reflete uma maior irregularidade nos padrões de distribuição das feições analisadas em relação às áreas de *Central Lapland* e Rio das Velhas. No entanto, é importante considerar que a diferença nas dimensões de cada área estudada em cada província pode ter influenciado a densidade de feições e, portanto, os graus de irregularidade medidos. A exceção ocorre para os lineamentos filtrados de *Abitibi*, para os quais os valores de  $\tau''(1)$  se mostraram os maiores de todas as análises. Isto pode ter ocorrido por um desconhecimento na literatura de alguma direção de lineamento relacionada às mineralizações, ou por ser uma característica deste sistema, ou seja, os depósitos estarem relacionados a estruturas de menor complexidade de distribuição espacial. A análise dos índices multifractais utilizados poderia explicar, em parte, o motivo pelo qual as províncias da Austrália e do Canadá têm maior quantidade de depósitos e de maior porte.

## 8.2. MAPAS DE DIMENSÕES FRACTAIS DE LINEAMENTOS MAGNÉTICOS

Os mapas de dimensões fractais dos lineamentos magnéticos mostram claramente a relação entre áreas com altos valores de dimensão fractal e/ou regiões de transição entre valores altos e baixos, e a ocorrência de depósitos minerais. Esta relação já foi demonstrada por outros autores (Haddad-Martim et al., 2017; Hodkiewicz et al., 2005; Zhao et al., 2011). Como as dimensões fractais têm relação direta com a complexidade e a densidade

das estruturas, estas sendo os principais condutos para os fluidos mineralizantes (Groves et al., 2018), os locais com grandes valores seriam áreas de grande permeabilidade e fluxo de fluidos. Já as zonas de transição seriam locais com estrangulamento e concentração de fluidos, com sua possível deposição e acumulação na forma de depósitos minerais. Ao comparar os perfis de dimensões fractais versus tonelagem de ouro dos depósitos (Figs. 5.18 a 5.21) com os mapas geológicos das regiões estudadas (Figs. 2.1 a 2.4), observa-se que os maiores valores são normalmente relacionados às porções metavulcânicas dos *greenstone belts*, que concentram a maior parte das litologias magnéticas, em contraste com as sequências clásticas adjacentes ou também plútons graníticos, que são mais homogêneos e apresentam menor quantidade de feições magnéticas. Estas unidades teriam menor permeabilidade e poderiam atuar, portanto, como selos que favoreceriam a acumulação e precipitação de metais em solução. Os contatos entre estas regiões são, portanto, as áreas de maior variação nas dimensões fractais e, por isso, concentram a maior quantidade de depósitos. Desta forma, estas zonas de transição são favoráveis à prospecção de novos depósitos de ouro.

### 8.3. ANÁLISE NA ESCALA DO LINEAMENTO CÓRREGO DO SÍTIO

O resultado da análise da distribuição espacial dos depósitos na região do lineamento Córrego do Sítio mostrou que ela é fractal, com dimensão fractal com valor de 0.971. Este valor é bastante próximo de 1 e é similar aos valores encontrados por Blenkinsop and Sanderson (1999), no estudo da distribuição de minas de ouro no Zimbábue. Do ponto de vista geométrico, o valor de dimensão fractal igual a 1 é a dimensão euclidiana de uma linha (Mandelbrot, 1983). Assim, é possível concluir que os depósitos na área de estudo seguem uma distribuição majoritariamente linear. Isto é devido ao fato de que sua disposição espacial é fortemente controlada pelas extensas zonas de cisalhamento predominantemente retilíneas que compõem o Lineamento Córrego do Sítio. O estudo multifractal dos lineamentos magnéticos da área demonstrou que a sua distribuição é multifractal. Os índices multifractais calculados serão discutidos mais adiante, na comparação entre as diferentes escalas estudadas.

### 8.4. ANÁLISE NA ESCALA DE LÂMINA

A análise por *box-counting* das formas dos grãos de sulfetos em lâmina mostrou diferenças entre as mineralizações disseminadas e de preenchimento de veios. Os valores de dimensão fractal do minério disseminado são maiores. Isto é devido a sua maior capacidade de preencher o espaço bidimensional, já que os grãos estão mais espalhados, além de existirem em maior número em relação ao minério venular. Os valores interquartis também apresentam maior variação nas amostras com sulfetos disseminados. As amostras com minério em veios apresentam pouca variação entre os quartis, mas maior quantidade de *outliers*.

Há presença de geometria multifractal na maioria, mas não em todas as imagens, sendo que as amostras que não exibiram geometria multifractal foram na maioria de mineralizações disseminadas. Isto pode implicar que a atuação conjunta de mais de um processo com caráter fractal não é a regra em escala microscópica. Por outro lado, é possível que a característica multifractal das mineralizações, nestes casos, não esteja expressa na geometria dos cristais de sulfetos, e sim em outras características, como, por exemplo, a distribuição dos teores de elementos. Neste caso, o método utilizado não é capaz de detectar este tipo de variação. Uma análise multifractal por “onduletas” (*wavelets*) (Arnéodo et al., 2003) poderia ser mais apropriada. Há também a possibilidade de que existam sulfetos de origem detrítica, como já foi indicado no trabalho de Pitcairn et al. (2006), em imagens de mineralizações disseminadas e, portanto, com distribuição aleatória e não multifractal.

As amostras de minério disseminado apresentaram valores absolutos de  $\tau(1)$  mais negativos do que as amostras com preenchimento de veios, o que, de acordo com Zhao et al. (2011), indica maior irregularidade no padrão de distribuição espacial. Os valores de  $\Delta\alpha$  das amostras com sulfetos disseminados também são mais negativos. Segundo os mesmos autores, este índice tem relação com os valores de dimensão fractal. Quanto mais negativos, maiores as dimensões fractais. Se nota que esta relação existe nas mineralizações de Córrego do Sítio, já que as amostras com grãos disseminados apresentaram maiores valores de dimensões fractais nas análises por *box-counting*. A variação de espectro multifractal ( $\Delta f(\alpha)$ ) tem relação com a predominância de valores maiores ou menores no conjunto de dados, se os seus valores forem negativos ou positivos, respectivamente (Zhao et al., 2011). O minério disseminado apresentou apenas valores negativos, o que indica uma distribuição regular dos grãos de sulfetos. Já o minério com preenchimento de veios apresentou valores positivos, apesar da maioria dos valores serem negativos; portanto, com uma diferença sutil entre os tipos de mineralização. Mesmo assim, isto pode indicar um maior agrupamento dos minerais e maiores áreas sem feições no minério venular. Isto deve ocorrer pois os sulfetos tendem a se concentrar em áreas estreitas, definidas pelas formas das vênulas.

#### 8.5. O CARÁTER MULTIFRACTAL DAS MINERALIZAÇÕES DE OURO OROGÊNICO

A existência de distribuições multifractais para os lineamentos magnéticos em escala regional e local, bem como para os grãos de sulfetos em lâmina, corrobora as conclusões dos trabalhos de Hobbs and Ord, (2018); Munro et al. (2018); Ord et al. (2016); Ord and Hobbs (2018), de que sistemas hidrotermais se comportam como reatores químicos abertos e distantes do equilíbrio, com atuação de processos não-lineares interconectados. Nestes sistemas, padrões de distribuição multifractal são originados a partir da interação de processos não-lineares, cada qual com uma distribuição ordenada espacialmente, com similaridade em diferentes escalas e, portanto, fractais.

### 9. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA MINERALIZAÇÃO EM DIFERENTES ESCALAS

O estudo da distribuição espacial de mineralizações de ouro orogênico em *greenstone belts* mostrou que elas apresentam caráter fractal, com a ocorrência de autossimilaridade em escala regional, local e microscópica. Em escala regional, através da análise por *box-counting* da distribuição dos depósitos de ouro, foi demonstrado que quatro das principais províncias deste tipo do mundo possuem distribuição fractal (*greenstone belts* de *Abitibi*, no Canadá, *Norseman-Wiluna* na Austrália, Rio das Velhas, no Brasil e *Central Lapland*, na Finlândia). Os valores de dimensões fractais estão indicados na tabela 4. Observa-se a existência de valores distintos em escalas abaixo de 2 km a 4 km, entre 2 km e 4 km até 10 km a 30 km e acima de 10 km a 30km, a depender da província estudada. Estas variações indicam padrões de distribuição distintos em cada escala, e a provável atuação de processos causadores distintos (Carranza 2009). Em escala local, seriam interseções de estruturas como dobras e falhas; na escala intermediária, sistemas hidrotermais de grande porte; e na escala regional, processos de dimensão crustal, como falhas transcrustais e metassomatismo do manto superior.

Os valores de dimensão fractal próximos a zero sugerem uma distribuição mais pontual ou agrupada, o que implica em processos de geração localizados. Já valores próximos a 1, indicam distribuições lineares, o que pode ser gerado pelo controle exercido por feições lineares como falhas e zonas de cisalhamento na disposição dos depósitos. Os maiores valores, próximos a 2, significam uma maior dispersão das feições analisadas, e implicam em um maior preenchimento do espaço, que sugerem processos de atuação dispersos ao longo das áreas de estudo.



Na escala local, a identificação de um padrão monofractal está provavelmente relacionado à escala de análise, que utilizou caixas de 0,5 km a 4km. Esta escala, como mencionado, é dominada pelos controles oriundos de estruturas geológicas como falhas e suas interseções, e dobras.

### 9.1. LINEAMENTOS MAGNÉTICOS

Foi demonstrado que os lineamentos magnéticos dos principais *greenstone belts* mundiais com sistemas minerais de ouro orogênico apresentam distribuição multifractal. Da mesma forma, foi constatada a característica multifractal destas feições na região do Lineamento Córrego do Sítio. Os índices multifractais calculados podem fornecer uma melhor comparação entre estas áreas, e estão exibidos na tabela 5. O parâmetro  $\tau''(1)$  (índice de multifractalidade) posiciona a região de Córrego do Sítio acima das províncias de *Central Lapland* e Rio das Velhas, mas abaixo de *Abitibi* e *Norseman-Wiluna*. Por ser uma medida da irregularidade do padrão de distribuição espacial das feições, e estar relacionada ao potencial de formação de depósitos (Zhao et al., 2011), este resultado confirma que a região tem elevada favorabilidade dentro do *greenstone* Rio das Velhas.

Já a variação de singularidade ( $\Delta(\alpha)$ ), de acordo com Zhao et al. (2011), indica graus de irregularidade locais, o comprimento total e o número de lineamentos, e está relacionada com quantidade de corpos de minério. Neste aspecto, se observa que os valores da área de estudo são muito similares às províncias de *Central Lapland* e Rio das Velhas, e inferiores às regiões de *Abitibi* e *Norseman-Wiluna*. O índice  $\Delta f(\alpha)$  na região estudada é positivo e próximo do valor obtido na região de *Abitibi*, o que indica predominância de valores menores no conjunto de dados, ou regiões com ausência de feições. Isto sugere um maior agrupamento dos lineamentos magnéticos. Isto provavelmente está relacionado à maior variação litológica e às zonas de cisalhamento do Lineamento Córrego do Sítio no centro da área, em contraste com regiões mais homogêneas nas margens. Esta distribuição das feições magnéticas também é diretamente relacionada à dos depósitos de ouro na área.

### 9.2. FORMAS DOS MINERAIS

Estudos anteriores demonstraram que sistemas minerais hidrotermais apresentam caráter multifractal (Ord et al., 2016). A grande variação nos valores de dimensões fractais obtidos nas análises desenvolvidas sobre os grãos de minério, além de serem causados por variações geométricas dos grãos e sua distribuição, também indicam a existência de uma distribuição multifractal destes minerais. Da mesma forma que nas escalas regional e local, se constatou que a geometria multifractal está presente na escala microscópica, na forma e distribuição espacial dos grãos de sulfetos relacionados à mineralização de Córrego do Sítio. A geração de assinaturas multifractais em minérios hidrotermais é devida a atuação de múltiplos processos com caráter fractal. No caso de depósitos de ouro orogênico, variações abruptas de pH e Eh, expressas na forma de teores de arsênio, exibiram autossimilaridade na relação com a ocorrência de depósitos no cráton *Yilgarn* (Ord et al., 2012), desde a escala de vários quilômetros, passando pela microescala, em cristais de pirita com ouro incluso, até a escala nanométrica, com teores de arsênio detectados junto a partículas de ouro (Reich et al., 2005). Estas distribuições do tipo lei de potência (*power-law*) são características de sistemas críticos (Sornette, 2004). Nas mineralizações de Córrego do Sítio, a ocorrência de ouro também está relacionada aos teores de arsênio na arsenopirita (Júnior et al., 2015). Isto possivelmente foi originado pela variação fractal no pH e Eh, como definido no trabalho de Ord et al. (2012), o que pode indicar o caráter de criticalidade no sistema mineral que atuou em Córrego do Sítio.

Outro processo de caráter fractal associado à formação de depósitos de ouro orogênico é a formação de fraturas, veios, brechas e *stockworks* em várias escalas espaciais, com a formação de pirita e pirrotita, em um período posterior a fase de alteração hidrotermal carbonática (Elmer et al., 2007). Este processo também é registrado nas mineralizações de Córrego do Sítio, nas quais a deposição do minério é relacionada a múltiplas fases hidrotermais, fraturamento e geração de veios (Pereira et al., 2013). Assim, o caráter multifractal da mineralização de ouro em Córrego do Sítio, identificado na forma dos grãos de sulfetos, deve estar relacionado à interação de processos formadores com características fractais. Isto reforça o conceito de que estes depósitos são formados a partir de sistemas termodinâmicos não-lineares de fluxo aberto, mantidos distantes do equilíbrio durante sua fase de formação através de processos de deformação e influxo de calor, fluidos e elementos químicos em dissolução (Ord et al., 2016). Estes sistemas devem ser estudados como tal, através de métodos de análise que permitam extrair mais informações de bases de dados, tais como a distribuição de estruturas geológicas e suas orientações, distribuição de minerais e teores de elementos.

## 10. CONCLUSÕES

A partir das análises desenvolvidas ao longo do trabalho, é possível estabelecer as seguintes conclusões:

- A distribuição espacial dos depósitos nas quatro províncias minerais abordadas é fractal, com atuação de processos distintos em escalas de depósito (<4 km), distrito (4 km a 30 km) e província (>30 km);
- Há presença de padrões fractais associados à distribuição espacial das mineralizações em diferentes escalas, desde a escala regional até a escala microscópica
- Há maior quantidade de mineralizações em locais onde estruturas de segunda ordem interceptam estruturas profundas, bem como nos cruzamentos de estruturas profundas;
- Os depósitos de ouro orogênico ocorrem em regiões de alta complexidade de lineamentos ou regiões com contrastes de complexidade, e em regiões com maior quantidade de interseções de lineamentos;
- Mapas de dimensões fractais de lineamentos magnéticos podem ser uma boa ferramenta para a prospecção de depósitos com controle estrutural, se utilizados juntamente com outros conjuntos de dados como geoquímica prospectiva, gamaespectrometria, imagens multiespectrais/hiperespectrais, dentre outros;
- Todas as áreas mostram lineamentos com distribuição multifractal. Os índices obtidos podem ser utilizados para caracterizar estas regiões. Por exemplo, as províncias com maior dotação para depósitos de ouro orogênico (*Abitibi* e *Norseman-Wiluna*) exibiram os maiores valores de  $\Delta\alpha$  (0,8112 e 0,9139 respectivamente vs. 0,6299 para Central Lapland e 0,6269 para o Rio das Velhas) e menores de  $\tau''(1)$  (-0,0494 e -0,0595 respectivamente vs. -0,0184 em Central Lapland e -0,0203 no Rio das Velhas). Este conceito pode ser útil na identificação do potencial mineral de outras áreas com disponibilidade de levantamentos aeromagnéticos;
- Há presença de geometria multifractal na distribuição espacial dos minerais de minério em lâmina em dois terços das fotomicrografias, sendo o restante apenas monofractais. Isto indica que nem sempre há a atuação conjunta de processos autossimilares nesta escala.

A análise fractal e multifractal de padrões e feições relacionados às mineralizações de ouro orogênico em *greenstone belts* se mostrou um meio eficaz para comparação entre diferentes províncias minerais

ao redor do mundo. A presença de padrões fractais associados à distribuição espacial das mineralizações em diferentes escalas sugere que padrões reconhecidos podem ser extrapolados entre elas, o que pode auxiliar na prospecção de novos recursos. O uso dos índices multifractais se mostrou eficaz na caracterização dos padrões de distribuição espacial das feições analisadas. No caso dos lineamentos magnéticos relacionados às mineralizações, o conhecimento de sua forma de distribuição pode definir se a prospecção deve se concentrar nos mesmos *trends* conhecidos, ou ser expandida para áreas fora destes domínios. Além disto, o estudo multifractal dos minerais em lâmina pode ser uma ferramenta útil na separação de diferentes tipos ou fases de mineralização.

A metodologia aqui empregada pode ser utilizada em estudos de outros sistemas minerais para verificar a presença de padrões ordenados com expressão em diferentes escalas, bem como de geometria multifractal que possa ter sido originada pela combinação de diferentes processos com invariância de escala, ou seja, geometria fractal. Estudos futuros podem comparar os índices multifractais com os teores e quantidades de minério tanto de depósitos minerais, quanto de amostras de minério, para definir sua capacidade de indicar, de forma quantitativa, o potencial mineral de uma área. Deste modo, pode-se concluir que as análises fractais e multifractais constituem uma técnica útil para o estudo de sistemas minerais de ouro orogênico em escala regional. Ressalta-se que é recomendável utilizar áreas de tamanho semelhante e levantamentos de igual resolução, para eliminar possíveis variações nos resultados que não sejam relacionadas às variações nos processos metalogenéticos. Estudos futuros podem ser desenvolvidos em outros tipos de mineralizações hidrotermais com controle estrutural para validar sua utilização em outros contextos geológicos.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Divisão de Geofísica (DISEGE) do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), na pessoa dos geofísicos Luis Gustavo, chefe da divisão, Isabelle Serafim e Vicente de Paula, pelo auxílio no processamento das imagens aerogeofísicas. Também à Priscila Oliveira, da Universidade Estadual de Campinas, pela ajuda na geração dos mapas de *worms* magnéticas. Agradecemos à AngloGold Ashanti Mineração Córrego do Sítio, especialmente ao geólogo Marco Antônio, pela separação e envio das amostras orientadas de testemunhos de sondagem, bem como pela disponibilização dos bancos de dados de medidas estruturais.

## REFERÊNCIAS

- Agterberg, F.P., Cheng, Q., Brown, A., Good, D., 1996. Multifractal Modeling of Fractures in the Lac Du Bonnet Batholith, Manitoba 22, 497–507.
- Alkmim, F.F., Marshak, S., 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: Evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research* 90, 29–58. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(98\)00032-1](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(98)00032-1)
- Archibald, N., Gow, P., Boschetti, F., 1999. Multiscale edge analysis of potential field data\*, *Exploration Geophysics*.

- Arias, M., Gumiel, P., Sanderson, D.J., Martin-Izard, A., 2011. A multifractal simulation model for the distribution of VMS deposits in the Spanish segment of the Iberian Pyrite Belt. *Computers and Geosciences* 37, 1917–1927. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.07.012>
- Arnéodo, A., Decoster, N., Kestener, P., Roux, S.G., 2003. A wavelet-based method for multifractal image analysis: From theoretical concepts to experimental applications. *Advances in Imaging and Electron Physics* 126, 1–92. [https://doi.org/10.1016/S1076-5670\(03\)80014-9](https://doi.org/10.1016/S1076-5670(03)80014-9)
- Baltazar, O.F., Zucchetti, M., 2007. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews* 32, 471–499. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.03.021>
- Bansal, A.R., Dimri, V.P., Kumar, R., Anand, S.P., 2016. Fractal Solutions for Understanding Complex Systems in Earth Sciences, *Fractal Solutions for Understanding Complex Systems in Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24675-8>
- Benn, K., Peschler, A.P., 2005. A detachment fold model for fault zones in the Late Archean Abitibi greenstone belt. *Tectonophysics* 400, 85–104. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.02.011>
- Blenkinsop, T.G., Sanderson, D.J., 1999. Are gold deposits in the crust fractals? A study of gold mines in the Zimbabwe craton. *Geological Society Special Publication* 155, 141–151. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.155.01.11>
- Blewett, R., 2010. Archean gold mineral systems in the eastern Yilgarn Craton “Although the study was based on the Yilgarn Craton , the results have general implications for other Archean terranes and mineral systems .” 1–8.
- Blewett, R.S., Henson, P.A., Roy, I.G., Champion, D.C., Cassidy, K.F., 2010. Scale-integrated architecture of a world-class gold mineral system: The Archaean eastern Yilgarn Craton, Western Australia. *Precambrian Research* 183, 230–250. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.06.004>
- Boots, B.N., Getis, A., 1988. *Point Pattern Analysis*.
- Carlson, C.A., 1991. Spatial distribution of ore deposits. *Geology* 19, 111–114. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0111:SDOOD>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0111:SDOOD>2.3.CO;2)
- Carranza, E.J.M., 2009. Controls on mineral deposit occurrence inferred from analysis of their spatial pattern and spatial association with geological features. *Ore Geology Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2009.01.001>
- Carranza, E.J.M., de Souza Filho, C.R., Haddad-Martim, P.M., Nagayoshi, K., Shimizu, I., 2019. Macro-scale ore-controlling faults revealed by micro-geochemical anomalies. *Scientific Reports* 9, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41019-1>

- Chainais, P., 2006. Multidimensional infinitely divisible cascades: Application to the modelling of intermittency in turbulence. *European Physical Journal B* 51, 229–243. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2006-00213-y>
- Cheng, Q., 1999. Multifractality and spatial statistics 25, 949–961.
- Cordell, L., Grauch, V.J.S., 1985. 16. Mapping Basement Magnetization Zones from Aeromagnetic Data in the San Juan Basin, New Mexico, in: *The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomaly Maps*. Society of Exploration Geophysicists, pp. 181–197. <https://doi.org/10.1190/1.0931830346.ch16>
- Czarnota, K., Champion, D.C., Goscombe, B., Blewett, R.S., Cassidy, K.F., Henson, P.A., Groenewald, P.B., 2010. Geodynamics of the eastern Yilgarn Craton. *Precambrian Research* 183, 175–202. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.08.004>
- Deng, B., Liu, S., Jansa, L., Yong, S., Zhang, Z., 2014. Fractal analysis of veins in Permian carbonate rocks in the Lingtanchang anticline, western China. *Geofluids* 14, 160–173. <https://doi.org/10.1111/gfl.12059>
- Deng, J., Wang, Q., Wan, L., Liu, H., Yang, L., Zhang, J., 2011. A multifractal analysis of mineralization characteristics of the Dayingezhuang disseminated-veinlet gold deposit in the Jiaodong gold province of China. *Ore Geology Reviews* 40, 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.05.001>
- Dorr, J.V.N., 1969. Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero Minas Gerais, Brazil, Geological Survey Professional Paper.
- Doutre, C., 2017. Multi-scale organisation and geological controls on large orogenic gold deposits 1–142.
- Elmer, F.L., Powell, R., White, R.W., Phillips, G.N., 2007. Timing of gold mineralization relative to the peak of metamorphism at Bronzewing, Western Australia. *Economic Geology* 102, 379–392. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.3.379>
- Farina, F., Albert, C., Martínez Dopico, C., Aguilar Gil, C., Moreira, H., Hippertt, J.P., Cutts, K., Alkmim, F.F., Lana, C., 2016. The Archean–Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Brasil): Current models and open questions. *Journal of South American Earth Sciences* 68, 4–21. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.10.015>
- Ferreira, F.J.F., de Souza, J., Bongiolo, A. de B. e. S., de Castro, L.G., 2013. Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle. *Geophysics* 78, J33–J41. <https://doi.org/10.1190/geo2011-0441.1>
- Ford, A., 2007. Application of fractal and multifractal analysis to the Mount Isa Inlier.
- Fry, N., 1979. Random point distributions and strain measurement in rocks. *Tectonophysics* 60, 89–105. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(79\)90135-5](https://doi.org/10.1016/0040-1951(79)90135-5)

- Gaboury, D., 2019. Parameters for the formation of orogenic gold deposits. *Applied Earth Science: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy* 128, 124–133. <https://doi.org/10.1080/25726838.2019.1583310>
- Groves, D.I., Barley, M.E., Shepherd, J.M., 1994. OVERVIEWS: Geology and mineralisation of Western Australia. *ASEG Extended Abstracts 1994*, 1–28. [https://doi.org/10.1071/ASEGSpec07\\_02](https://doi.org/10.1071/ASEGSpec07_02)
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G., Robert, F., 1998. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews* 13, 7–27. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(97\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(97)00012-7)
- Grohmann, C.H., Campanha, G.A.C. and Soares Junior, A.V., 2011. OpenStereo: um programa Livre e multiplataforma para análise de dados estruturais. In: XIII Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos.
- Groves, D.I., Santosh, M., Deng, J., Wang, Q., Yang, L., Zhang, L., 2020. A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration. *Mineralium Deposita* 55, 275–292. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00877-5>
- Groves, D.I., Santosh, M., Goldfarb, R.J., Zhang, L., 2018. Structural geometry of orogenic gold deposits: Implications for exploration of world-class and giant deposits. *Geoscience Frontiers* 9, 1163–1177. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.01.006>
- Gumiel, P., Sanderson, D.J., Arias, M., Roberts, S., Martín-izard, A., 2010. Analysis of the fractal clustering of ore deposits in the Spanish Iberian Pyrite Belt. *Ore Geology Reviews* 38, 307–318. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.08.001>
- Haddad-Martim, P.M., Carranza, E.J.M., De Souza Filho, C.R., 2018. The fractal nature of structural controls on ore formation: The Case of the Iron oxide copper-gold deposits in the carajás mineral province, Brazilian amazon. *Economic Geology* 113, 1499–1524. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4600>
- Haddad-Martim, P.M., Souza Filho, C.R. de, Carranza, E.J.M., 2017. Spatial analysis of mineral deposit distribution: A review of methods and implications for structural controls on iron oxide-copper-gold mineralization in Carajás, Brazil. *Ore Geology Reviews* 81, 230–244. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.038>
- Halsey, T.C., Jensen, M.H., Kadanoff, L.P., Procaccia, I., Shraiman, B.I., 1987. Fractal measures and their singularities: The characterization of strange sets. *Nuclear Physics B (Proceedings Supplements)* 2, 501–511. [https://doi.org/10.1016/0920-5632\(87\)90036-3](https://doi.org/10.1016/0920-5632(87)90036-3)
- Hanski, E., Huhma, H., 2005. Chapter 4 Central Lapland greenstone belt, in: *BMC Public Health*. pp. 139–193. [https://doi.org/10.1016/S0166-2635\(05\)80005-2](https://doi.org/10.1016/S0166-2635(05)80005-2)
- Heilbronner, R., 2015. Image analysis in earth sciences, *Geotectonic Research*. <https://doi.org/10.1127/1864-5658/2015-56>

- Hobbs, B.E., Ord, A., 2018. Episodic modes of operation in hydrothermal gold systems: Part II. A model for gold deposition. *Geological Society Special Publication* 453, 147–164. <https://doi.org/10.1144/SP453.15>
- Hodkiewicz, P.F., Weinberg, R.F., Gardoll, S.J., Groves, D.I., 2005. Complexity gradients in the Yilgarn Craton: Fundamental controls on crustal-scale fluid flow and the formation of world-class orogenic-gold deposits. *Australian Journal of Earth Sciences* 52, 831–841. <https://doi.org/10.1080/08120090500304257>
- Isles, D.J., Rankin, L.R., 2013. *Geological Interpretation of Aeromagnetic Data*, Science. Society of Exploration Geophysicists and Australian Society of Exploration Geophysicists. <https://doi.org/10.1190/1.9781560803218>
- Júnior, J.G.R., Lobato, L.M., Lima, L.C., Porto, C.G., Figueiredo E Silva, R.C., 2015. Metaturbidite-hosted gold deposits, córrego do sítio lineament, quadrilátero ferrífero, Brazil. *Brazilian Journal of Geology* 45, 5–22. <https://doi.org/10.1590/23174889201500010001>
- Karperien, A., 2013. FracLac for ImageJ. <http://rsb.info.nih.gov/ij/plugins/fractal/FLHelp/Introduction.htm>
- Kreuzer, O.P., Blenkinsop, T.G., Morrison, R.J., Peters, S.G., 2007. Ore controls in the Charters Towers goldfield, NE Australia: Constraints from geological, geophysical and numerical analyses. *Ore Geology Reviews* 32, 37–80. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.12.001>
- Kruhl, J.H., 2013. Fractal-geometry techniques in the quantification of complex rock structures: A special view on scaling regimes, inhomogeneity and anisotropy. *Journal of Structural Geology* 46, 2–21. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.10.002>
- Ladyman, J., Lambert, J., Wiesner, K., 2013. What is a complex system? *European Journal for Philosophy of Science*. <https://doi.org/10.1007/s13194-012-0056-8>
- Lester, D.R., Ord, A., Hobbs, B.E., 2012. The mechanics of hydrothermal systems: II. Fluid mixing and chemical reactions. *Ore Geology Reviews* 49, 45–71. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.08.002>
- Lima, L.C., 2012. *Geologia do depósito lode Au-As-Sb Laranjeiras, em metaturbitos do Grupo Nova Lima, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil.*
- Lisitsin, V., 2015. Spatial data analysis of mineral deposit point patterns: Applications to exploration targeting. *Ore Geology Reviews* 71, 861–881. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.05.019>
- Lobato, L.M., Ribeiro-Rodrigues, L.C., Vieira, F.W.R., 2001. Brazil's premier gold province. Part II: geology and genesis of gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita* 36, 249–277. <https://doi.org/10.1007/s001260100180>
- Mamtani, M.A., 2012. Fractal analysis of magnetite grains — implications for interpreting deformation mechanism. *Journal of the Geological Society of India* 80, 308–313. <https://doi.org/10.1007/s12594-012-0149-1>
- Mandelbrot, B., 1983. *The fractal geometry of nature.*

- Martins, R., 2017. Cuiabá Gold Mine – Exploration Success in a Mature Greenstone Belt – Iron Quadrangle – MG – Brazil, PDAC 2017 – Brazilian Mining Day
- Mccuaig, T.C., Beresford, S., Hronsky, J., 2010. Translating the mineral systems approach into an effective exploration targeting system. *Ore Geology Reviews* 38, 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.05.008>
- Miller, H.G., Singh, V., 1994. Potential field tilt a new concept for location of potential field sources, *Journal of Applied Geophysics*.
- Munro, M.A., Ord, A., Hobbs, B.E., 2018. Spatial organization of gold and alteration mineralogy in hydrothermal systems: Wavelet analysis of drillcore from Sunrise Dam Gold Mine, Western Australia. *Geological Society Special Publication* 453, 165–204. <https://doi.org/10.1144/SP453.10>
- Nabighian, M.N., 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation, *Geophysics*.
- Ni, C., Zhang, S., Chen, Z., Yan, Y., Li, Y., 2017. Mapping the Spatial Distribution and Characteristics of Lineaments Using Fractal and Multifractal Models: A Case Study from Northeastern Yunnan Province. *Scientific Reports* 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11027-0>
- Oliveira, P.M., 2019. Assinaturas magnéticas e gravimétricas das intrusões de lamproítos da Província Diamantífera Oeste de Kimberley, Austrália Ocidental. Unicamp.
- Ord, A., Hobbs, B.E., 2018. Episodic modes of operation in hydrothermal gold systems: Part I. Deformation, mineral reactions and chaos. *Geological Society Special Publication* 453, 121–146. <https://doi.org/10.1144/SP453.14>
- Ord, A., Hobbs, B.E., Lester, D.R., 2012. The mechanics of hydrothermal systems: I. Ore systems as chemical reactors. *Ore Geology Reviews* 49, 1–44. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.08.003>
- Ord, A., Munro, M., Hobbs, B., 2016. Hydrothermal mineralising systems as chemical reactors: Wavelet analysis, multifractals and correlations. *Ore Geology Reviews* 79, 155–179. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.03.026>
- Percival, J.A., 2007. Geology and Metallogeny of the Superior Province, Canada. *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods Special Publication No. 5* 903–928.
- Pereira, M.A.S., Lobato, L.M., Rosière, C.A., Figueiredo e Silva, R.C., 2013. Classificação Dos Veios Quartzo-Carbonáticos De Depósitos Auríferos No Lineamento Córrego Do Sítio, Qf, Mg. *Geonomos*. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v21i2.272>



- Peternell, M., Kruhl, J.H., 2009. Automation of pattern recognition and fractal-geometry-based pattern quantification, exemplified by mineral-phase distribution patterns in igneous rocks. *Computers and Geosciences* 35, 1415–1426. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.11.001>
- Phillips, G.N., Powell, R., 2010. Formation of gold deposits: A metamorphic devolatilization model. *Journal of Metamorphic Geology* 28, 689–718. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2010.00887.x>
- Pirajno, F., 2016. A classification of mineral systems, overviews of plate tectonic margins and examples of ore deposits associated with convergent margins. *Gondwana Research* 33, 44–62. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.08.013>
- Pitcairn, I.K., Teagle, D.A.H., Craw, D., Olivo, G.R., Kerrich, R., Brewer, T.S., 2006. Sources of metals and fluids in orogenic gold deposits: Insights from the Otago and Alpine schists, New Zealand. *Economic Geology* 101, 1525–1546. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.101.8.1525>
- Porto, C.G., 2008. “A mineralização aurífera do depósito Córrego do Sítio e sua relação com o enxame de diques metamáficos no corpo Cachorro Bravo – Quadrilátero Ferrífero – MG.”
- Prado, E.M.G., de Souza Filho, C.R., Carranza, E.J.M., Motta, J.G., 2020. Modeling of Cu-Au prospectivity in the Carajás mineral province (Brazil) through machine learning: Dealing with imbalanced training data. *Ore Geology Reviews* 124, 103611. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103611>
- Raines, G.L., 2008. Are fractal dimensions of the spatial distribution of mineral deposits meaningful? *Progress in Geomathematics* 17, 285–301. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-69496-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69496-0_13)
- Reich, M., Kesler, S.E., Utsunomiya, S., Palenik, C.S., Chryssoulis, S.L., Ewing, R.C., 2005. Solubility of gold in arsenian pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69, 2781–2796. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.01.011>
- Sayab, M., Molnár, F., Aerden, D., Niiranen, T., Kuva, J., Välimaa, J., 2019. A succession of near-orthogonal horizontal tectonic shortenings in the Paleoproterozoic Central Lapland Greenstone Belt of Fennoscandia: constraints from the world-class Suurikuusikko gold deposit. *Mineralium Deposita*. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00910-7>
- Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietzsch, T., Preibisch, S., Rueden, C., Saalfeld, S., Schmid, B., Tinevez, J.Y., White, D.J., Hartenstein, V., Eliceiri, K., Tomancak, P., Cardona, A., 2012. Fiji: An open-source platform for biological-image analysis. *Nature Methods* 9, 676–682. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2019>
- Sornette, D., 2004. *Critical Phenomena in Natural Sciences: Chaos, Fractals*.
- Sun, T., Chen, F., Zhong, L., Liu, W., Wang, Y., 2019. GIS-based mineral prospectivity mapping using machine learning methods: A case study from Tongling ore district, eastern China. *Ore Geology Reviews* 109, 26–49. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.04.003>

- Swain, S.K., Roy, P.N.S., Mukherjee, B., Sawkar, R.H., 2019. Fractal dimension and its translation into a model of gold spatial proxy. *Ore Geology Reviews* 110, 102935. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.102935>
- Teixeira, W., Ávila, C.A., Dussin, I.A., Corrêa Neto, A. V., Bongioiolo, E.M., Santos, J.O., Barbosa, N.S., 2015. A juvenile accretion episode (2.35-2.32Ga) in the Mineiro belt and its role to the Minas accretionary orogeny: Zircon U-Pb-Hf and geochemical evidences. *Precambrian Research* 256, 148–169. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.11.009>
- Thévenaz, P., Unser, M., 2007. User-friendly semiautomated assembly of accurate image mosaics in microscopy. *Microscopy Research and Technique* 70, 135–146. <https://doi.org/10.1002/jemt.20393>
- Thompson, D.T., 1982. EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *GEOPHYSICS* 47, 31–37. <https://doi.org/10.1190/1.1441278>
- Tomkins, A.G., 2013. On the source of orogenic gold. *Geology* 41, 1255–1256. <https://doi.org/10.1130/focus122013.1>
- Turcotte, D.L., 1989. Fractals in Geology and Geophysics. *PAGEOPH* 131.
- Vearncombe, J., Zelic, M., 2015. Structural paradigms for gold: Do they help us find and mine? *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section B: Applied Earth Science* 124, 2–19. <https://doi.org/10.1179/1743275815Y.0000000003>
- Wang, Q., Deng, J., Liu, H., Yang, L., Wan, L., Zhang, R., 2010. Fractal models for ore reserve estimation. *Ore Geology Reviews* 37, 2–14. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2009.11.002>
- Wang, Z., Cheng, Q., Cao, L., Xia, Q., Chen, Z., 2007. Fractal modelling of the microstructure property of quartz mylonite during deformation process. *Mathematical Geology* 39, 53–68. <https://doi.org/10.1007/s11004-006-9065-5>
- Witt, W.K., Cassidy, K.F., Lu, Y.J., Hagemann, S.G., 2020. The tectonic setting and evolution of the 2.7 Ga Kalgoorlie–Kurnalpi Rift, a world-class Archean gold province. *Mineralium Deposita* 55, 601–631. <https://doi.org/10.1007/s00126-017-0778-9>
- Xie, S., Bao, Z., 2004. Fractal and multifractal properties of geochemical fields. *Mathematical Geology* 36, 847–864. <https://doi.org/10.1023/B:MATG.0000041182.70233.47>
- Xie, S., Cheng, Q., Zhang, S., Huang, K., 2010. Assessing microstructures of pyrrhotites in basalts by multifractal analysis. *Nonlinear Processes in Geophysics* 17, 319–327. <https://doi.org/10.5194/npg-17-319-2010>
- Zhao, J., Chen, S., Zuo, R., Carranza, E.J.M., 2011. Mapping complexity of spatial distribution of faults using fractal and multifractal models: Vectoring towards exploration targets. *Computers and Geosciences* 37, 1958–1966. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.04.007>

Zuo, R., Cheng, Q., Xia, Q., Agterberg, F.P., 2009. Application of fractal models to distinguish between different mineral phases. *Mathematical Geosciences* 41, 71–80. <https://doi.org/10.1007/s11004-008-9191-3>

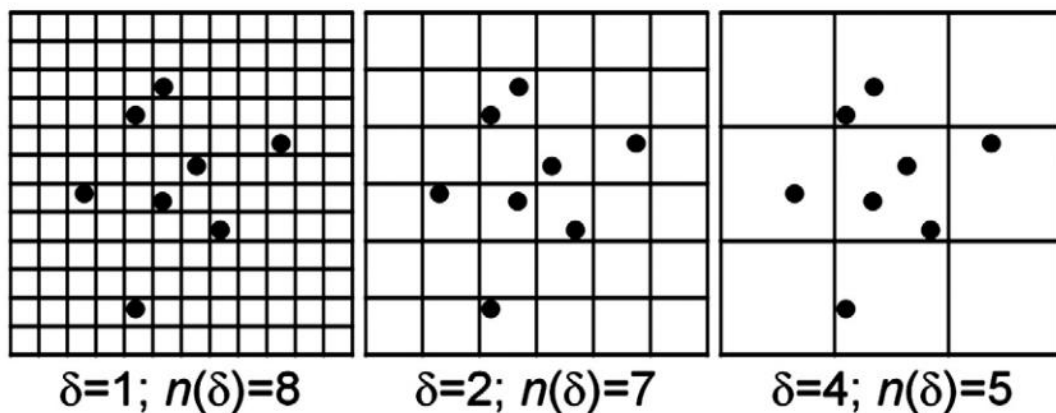
## APÊNDICE A - EMBASAMENTO TEÓRICO

### 1. ANÁLISE FRACTAL POR *BOX-COUNTING*

A análise por *box-counting* é feita a partir da definição de uma grade de células ou um *raster* com pixels de aresta  $\delta$  sobre um mapa de feições, tais como pontos ou linhas. A quantidade de quadrados ou pixels que contêm uma ou mais feições  $n(\delta)$  é contada. Este procedimento é repetido para diferentes valores de  $\delta$  (Figura 1.1). A distribuição das feições será considerada fractal se a mesma obedecer a seguinte *power-law* (e.g., Carranza (2009)):

$$n(\delta) = C\delta^{-D_b} \quad (1)$$

na qual C é uma constante de proporcionalidade entre  $n(\delta)$  e  $\delta$ , e  $D_b$  é a dimensão fractal, com valor entre 0 e 2, que corresponde à inclinação do gráfico log-log de  $n(\delta)$  vs.  $\delta$ .



**Fig. 1.1** Processo iterativo realizado na análise por *box-counting*. A aresta das caixas ( $\delta$ ) é progressivamente diminuída, e o número de caixas que contêm feições  $n(\delta)$  é contado até que haja uma caixa por feição, aproximadamente. Estas duas variáveis são confrontadas em um gráfico log-log, cuja inclinação fornece o valor da dimensão fractal. Fonte: Carranza (2009)

### 2. ANÁLISE MULTIFRACTAL PELO MÉTODO DOS MOMENTOS

A análise multifractal pelo método dos momentos é executada pelo seguinte procedimento: de acordo com Ni et al., (2017), para estudar a distribuição de uma variável no espaço, é feita sua divisão em uma grade, de forma similar ao modelo anterior, porém com diferentes escalas de observação. Supondo que  $\mu_i(\varepsilon)$  representa a medida do número de lineamentos contidos na  $i$ -ésima caixa de escala  $\varepsilon$ , os valores se distribuiriam no espaço de acordo com a equação, onde  $\alpha$  denota proporção:

$$\mu_i(\varepsilon) \propto \varepsilon^\alpha \quad (2)$$

devido à irregularidade da distribuição dos lineamentos no espaço, temos:

$$\mu_i(\varepsilon) \propto \varepsilon^{\alpha_i} \quad (3)$$

na qual  $\alpha$  é denominado expoente de singularidade ou expoente local Hölder (Ni et al. 2017).

Diferentes células possuem diferentes valores de  $\alpha$ .  $N\alpha(\varepsilon)$  é o número de células com um certo valor de  $\alpha$ . Se esta função satisfizer a seguinte *power-law* de escala  $\varepsilon$ :

$$N\alpha(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-f(\alpha)} \quad (4)$$

então estas células formam um conjunto fractal, sendo que  $f(\alpha)$  representa o espectro multifractal. Para calcular o espectro multifractal é feito o uso da seguinte equação de partição de massa (Eq. 5):

$$x_q(\varepsilon) = \sum_{N(\varepsilon)} \mu_i^q(\varepsilon) \quad (5)$$

na qual  $q$  é o expoente da função de partição. Se  $\mu(\varepsilon)$  é multifractal, a relação entre a função de partição  $x_q(\varepsilon)$  e o tamanho  $\varepsilon$  satisfazem a seguinte relação tipo *power-law*:

$$x_q(\varepsilon) \propto \varepsilon^{\tau(q)} \quad (6)$$

onde o expoente  $\tau(q)$  é denominado função de massa de ordem  $q$  e este pode ser analisado através da inclinação das linhas do gráfico log-log de  $x_q(\varepsilon)$  vs  $\varepsilon$ . Por fim, uma transformação de *Legendre* é utilizada para obtenção do expoente de singularidade  $\alpha$  e o espectro multifractal  $f(\alpha)$  (Evertsz e Mandelbrot, 1992):

$$\alpha(q) = \frac{\partial \tau(q)}{\partial q} \quad \text{e} \quad f(\alpha(q)) = \alpha(q)q - \tau(q) \quad (7)$$

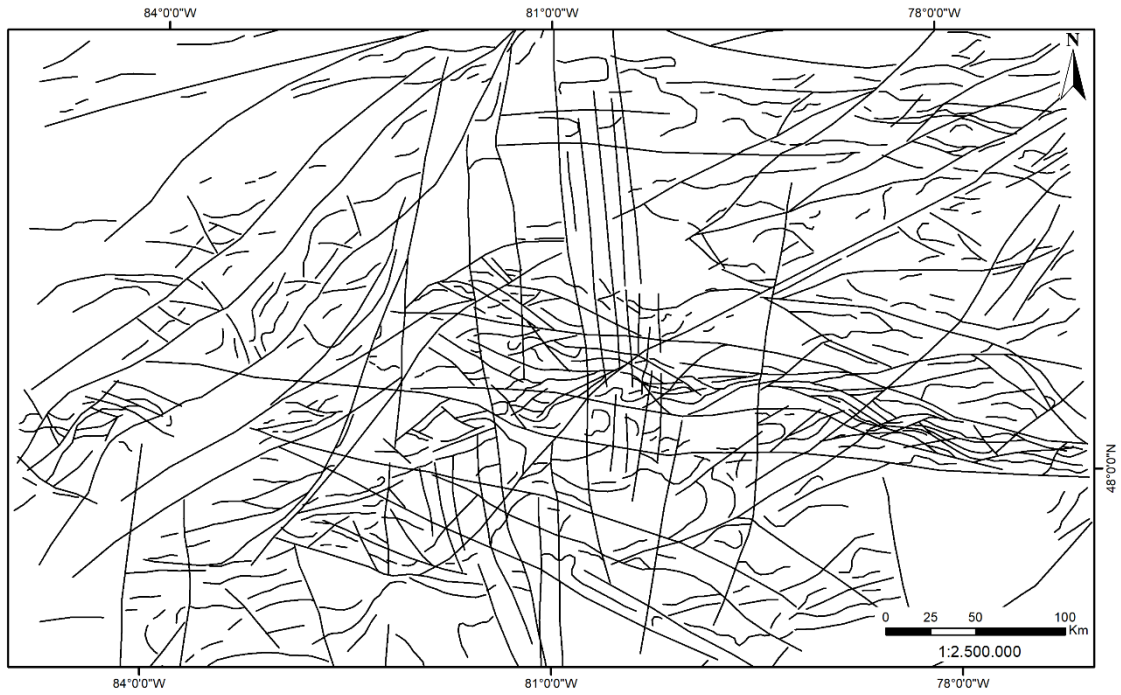
## APÊNDICE B - BASES DE DADOS ANALISADAS

### 1. LINEAMENTOS MAGNÉTICOS INTERPRETADOS

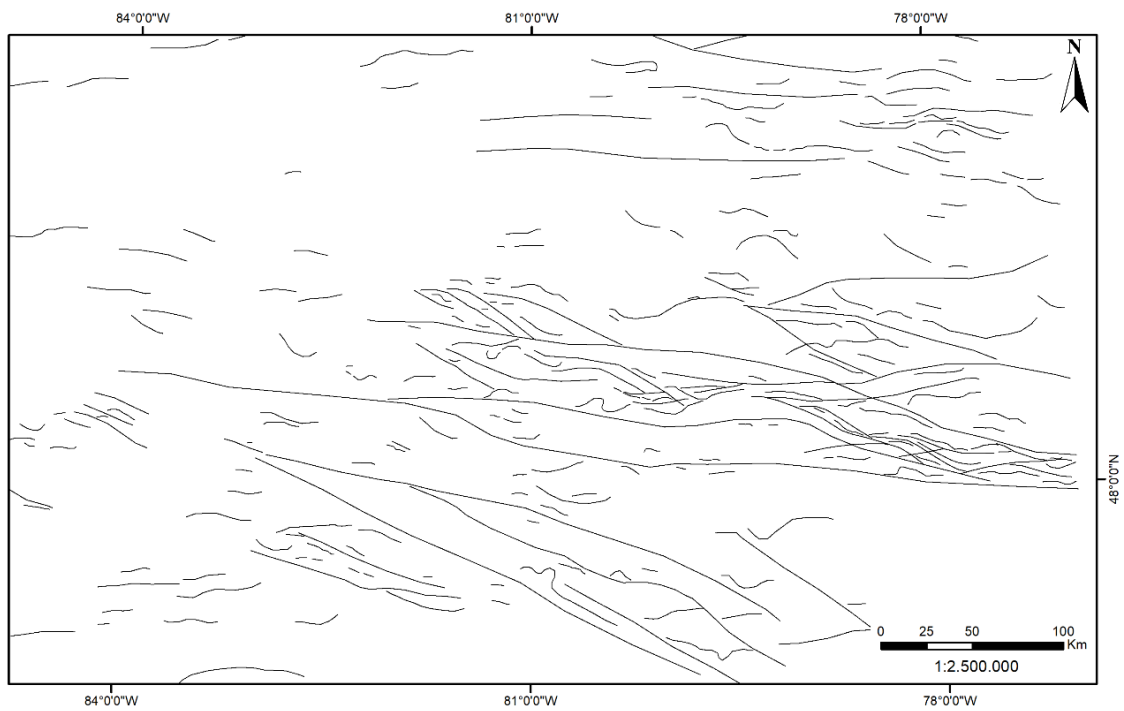
Os mapas de lineamentos magnéticos para todas as áreas estudadas, obtidos a partir da interpretação das imagens aerogeofísicas com o uso da metodologia proposta pela ASEG (*Australian Society of Exploration Geophysicists*) (Isles and Rankin 2013), estão exibidos a seguir. Há mapas com todos os lineamentos interpretados, mapas com lineamentos filtrados nas direções favoráveis às mineralizações de acordo com a literatura (Tabela 1), e mapas com os pontos de interseção entre todos os lineamentos, já que a interação de estruturas pode gerar sítios favoráveis à acumulação de minério em depósitos de tipo ouro orogênico (Groves et al. 2018).

**Tabela 1.** Idades e principais macro-estruturas relacionadas às mineralizações, e suas respectivas direções predominantes

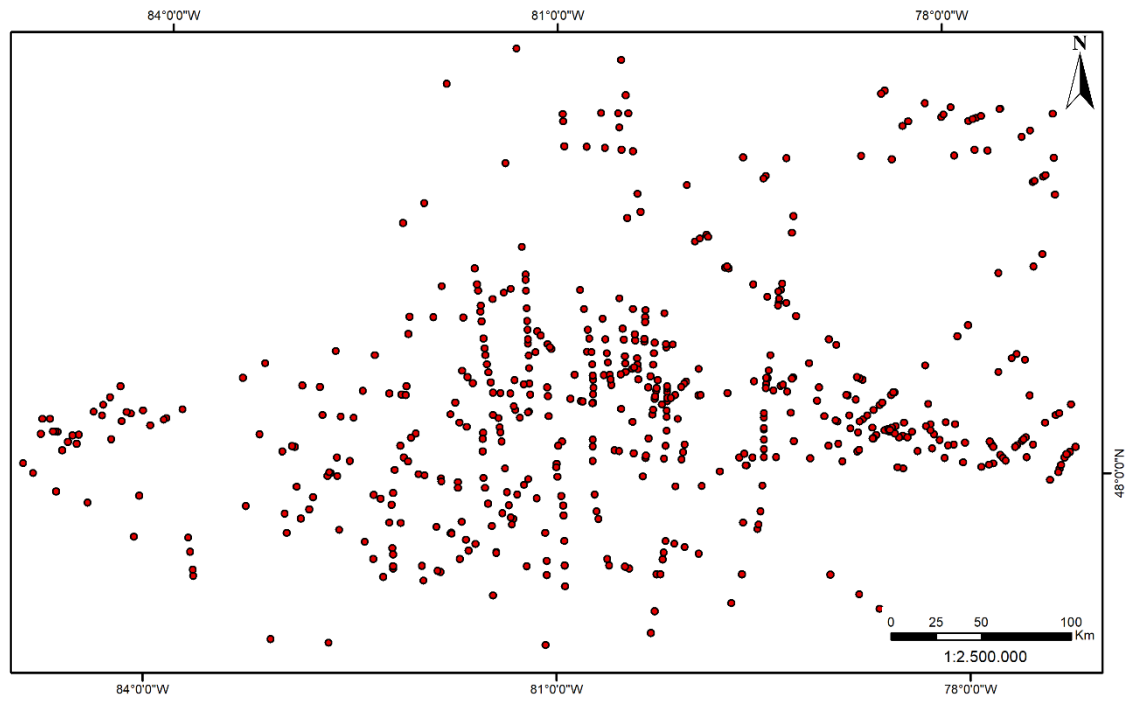
Greenstone Belt	Idade da mineralização	Macro-estruturas	Direções	Fonte
Norseman-Wiluna	2.665-2.62 Ga	Falha de <i>Ida</i> ; Zona de Cisalhamento <i>Ockerburry</i> ; Domos D <sub>3</sub> - ( <i>Golden Corridor</i> )	NNW-NW	(Blewett 2010)
Abitibi	2.69-2.68 Ga	Falha Porcupine-Destor; Falha Larder Lake-Cadillac	WNW-NW	(Percival 2007)
Central Lapland	1.92-1.76 Ga	Zona de Cisalhamento <i>Kiistala</i> ; Zona de Empurrão <i>Sirkka</i>	NNE-NS-NNW (Kiistala); NW-WNW (Sirkka)	(Sayab et al. 2019)
Rio das Velhas	2.75-2.67 Ga;	Zonas de Cisalhamento Paciência, São Vicente e Raposos; Lineamento Córrego do Sítio	NW-NE-NS	(Baltazar and Zucchetti 2007; Júnior et al. 2015)



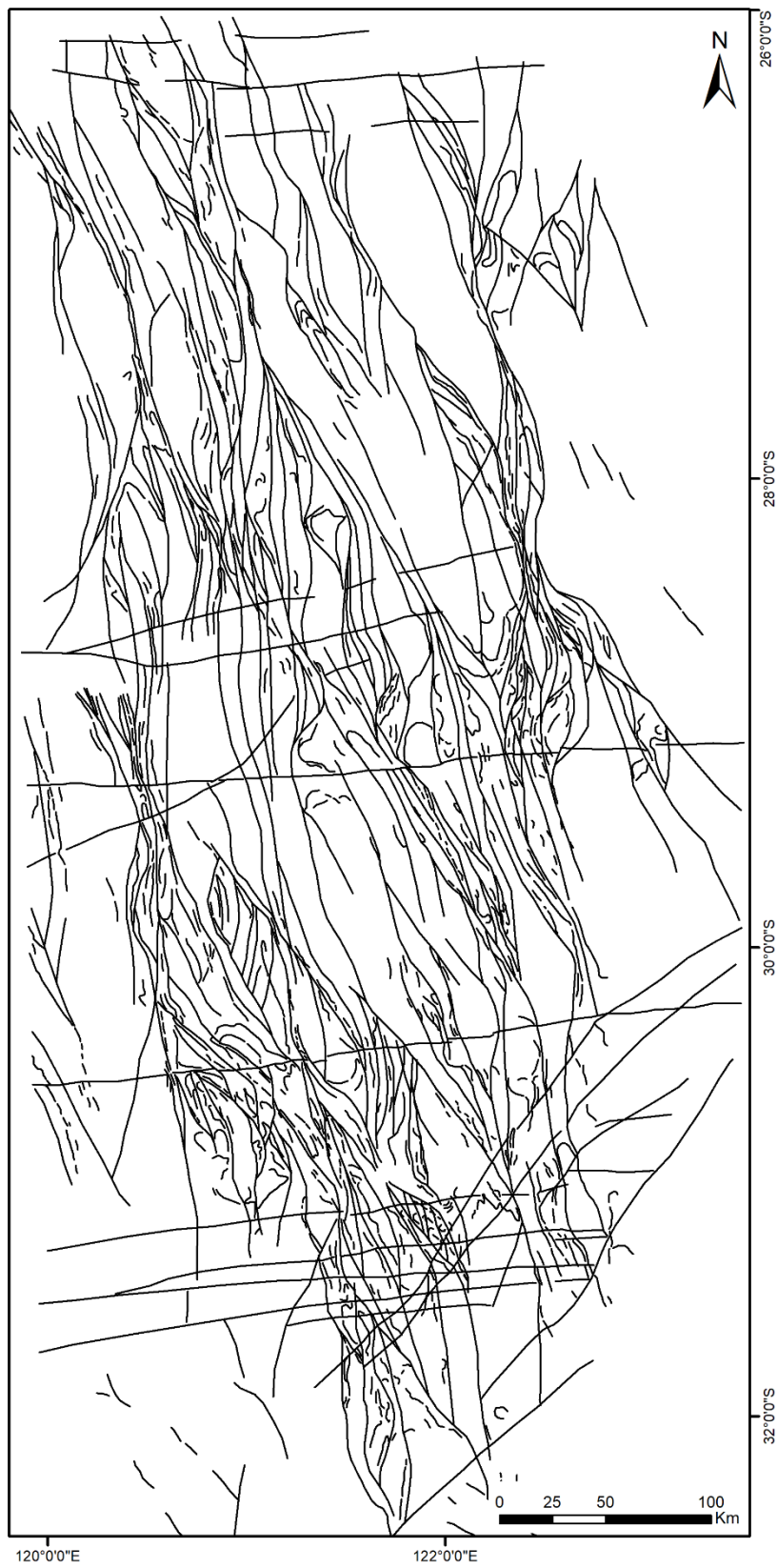
**Fig. 1.1.** Mapa de lineamentos magnéticos da área do *greenstone belt Abitibi*, sem a aplicação de filtros direcionais



**Fig. 1.2.** Mapa de lineamentos magnéticos da área do *greenstone belt Abitibi*, com a aplicação de filtros nas direções WNW-ESE e NW-SE (referências na tabela 1)

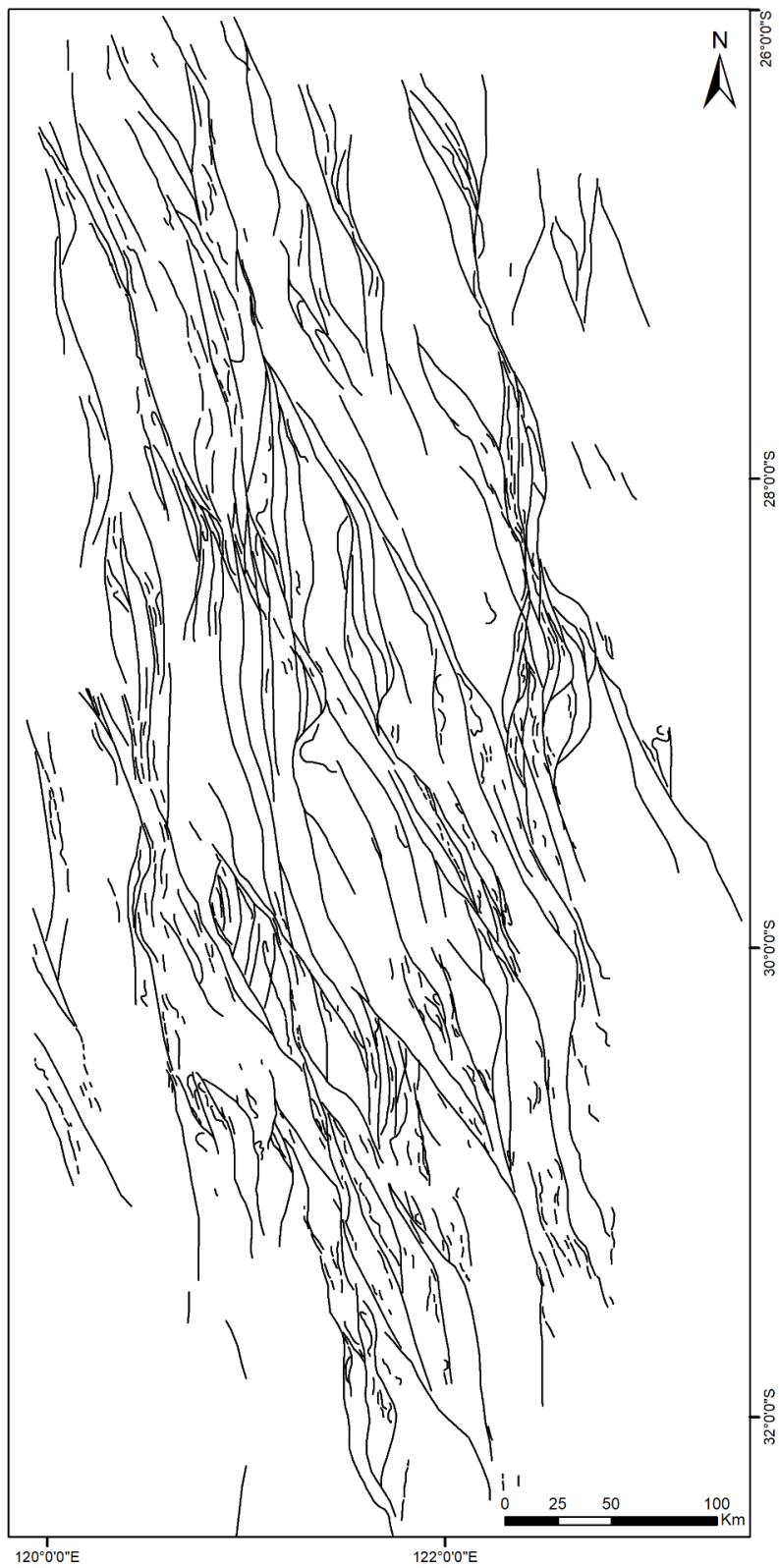


**Fig. 1.3.** Mapa dos pontos de interseção entre todos os lineamentos magnéticos interpretados para a região do *greenstone belt* Abitibi

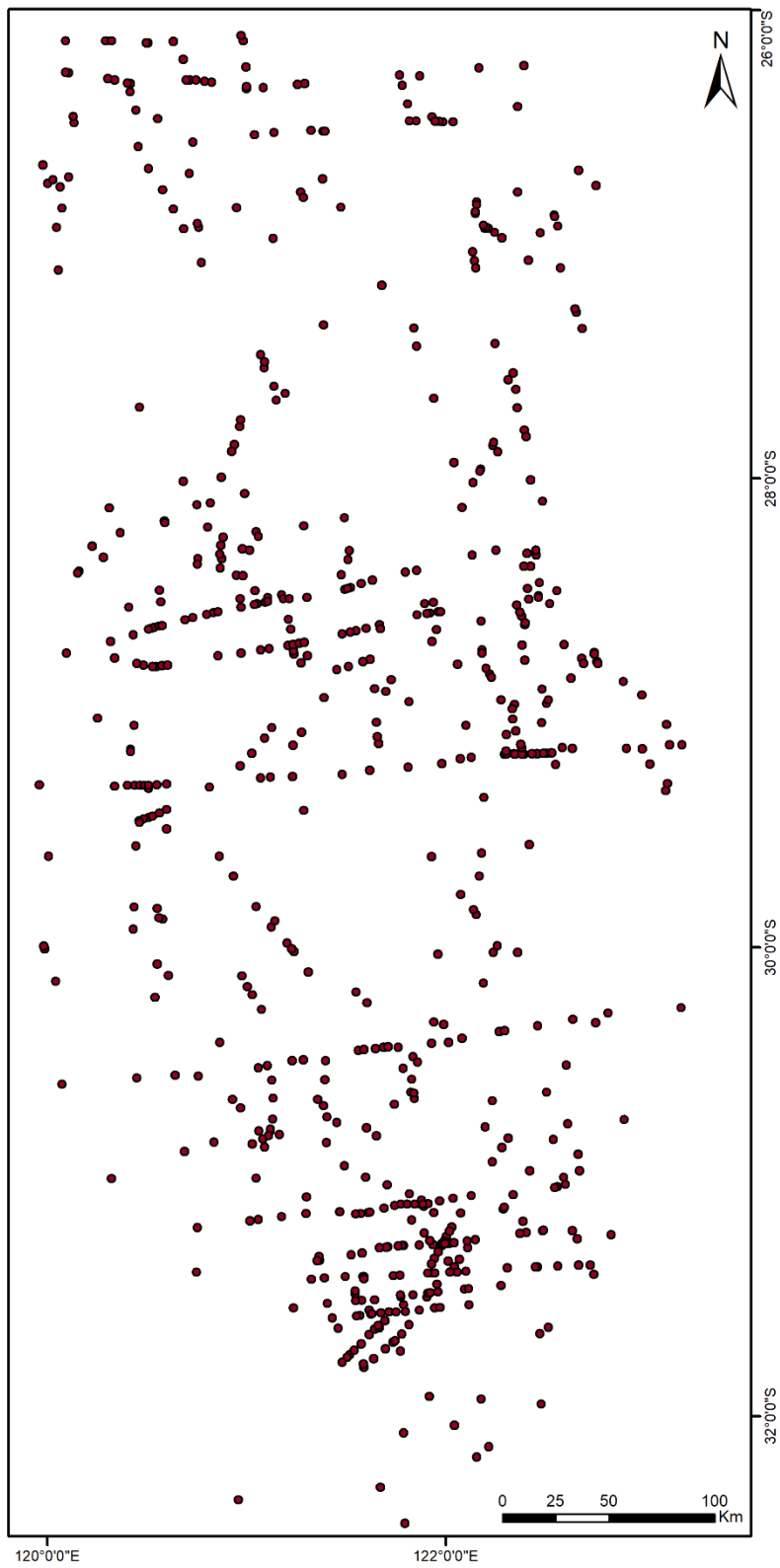


**Fig. 1.4.** Mapa de lineamentos magnéticos da área do *greentone belt Norseman-Wiluna*, sem a aplicação de filtros direcionais





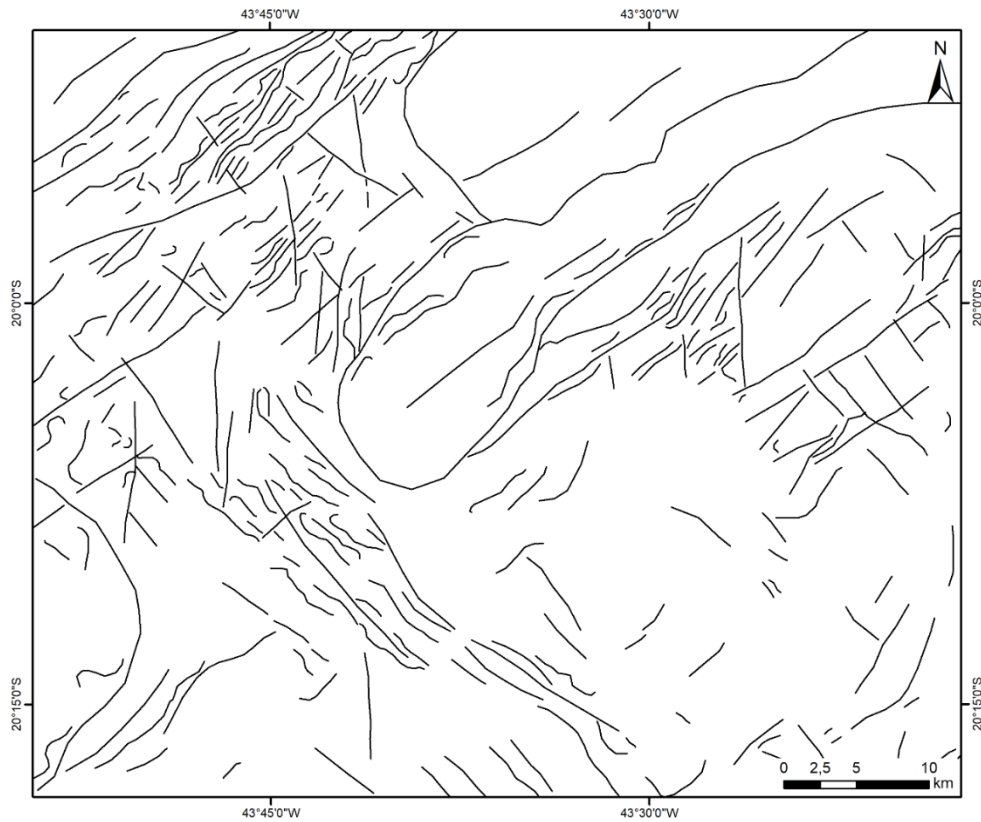
**Fig. 1.5.** Mapa de lineamentos magnéticos da área do *greenstone belt Norseman-Wiluna*, com a aplicação de filtros nas direções NNW-SSE e NW-SE (referências na tabela 1)



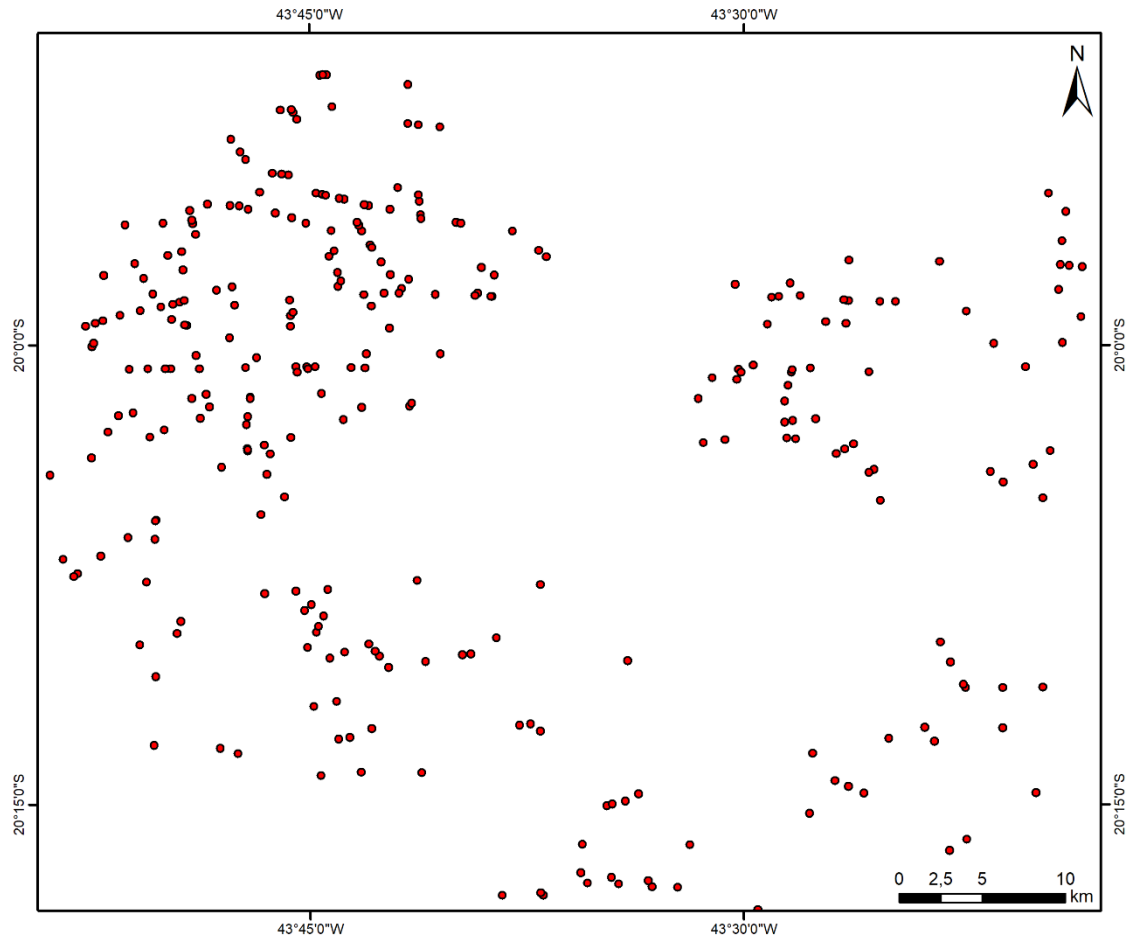
**Fig. 1.6.** Mapa dos pontos de interseção entre todos os lineamentos magnéticos interpretados para a região do *greenstone belt* Abitibi



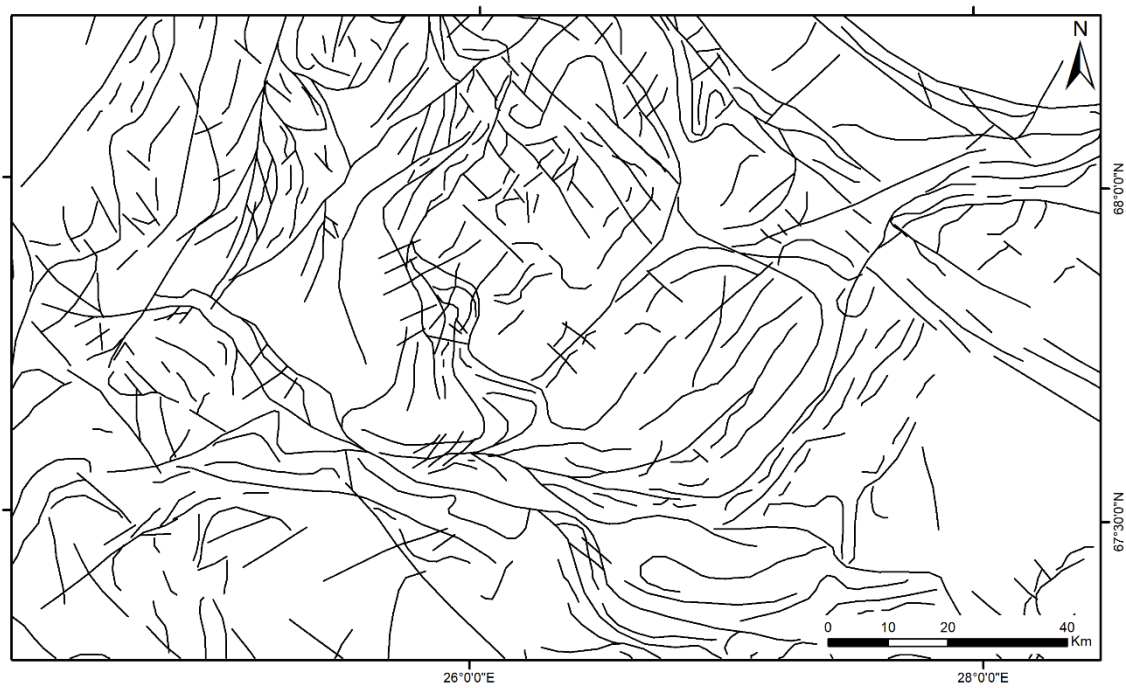
**Fig. 1.7.** Mapa de lineamentos magnéticos da área do *greentone belt* Rio das Velhas, sem a aplicação de filtros direcionais



**Fig. 1.8.** Mapa de lineamentos magnéticos da área do *greenstone belt* Rio das Velhas, com a aplicação de filtros nas direções NW-SE, NE-SW e N-S (referências na tabela 1)



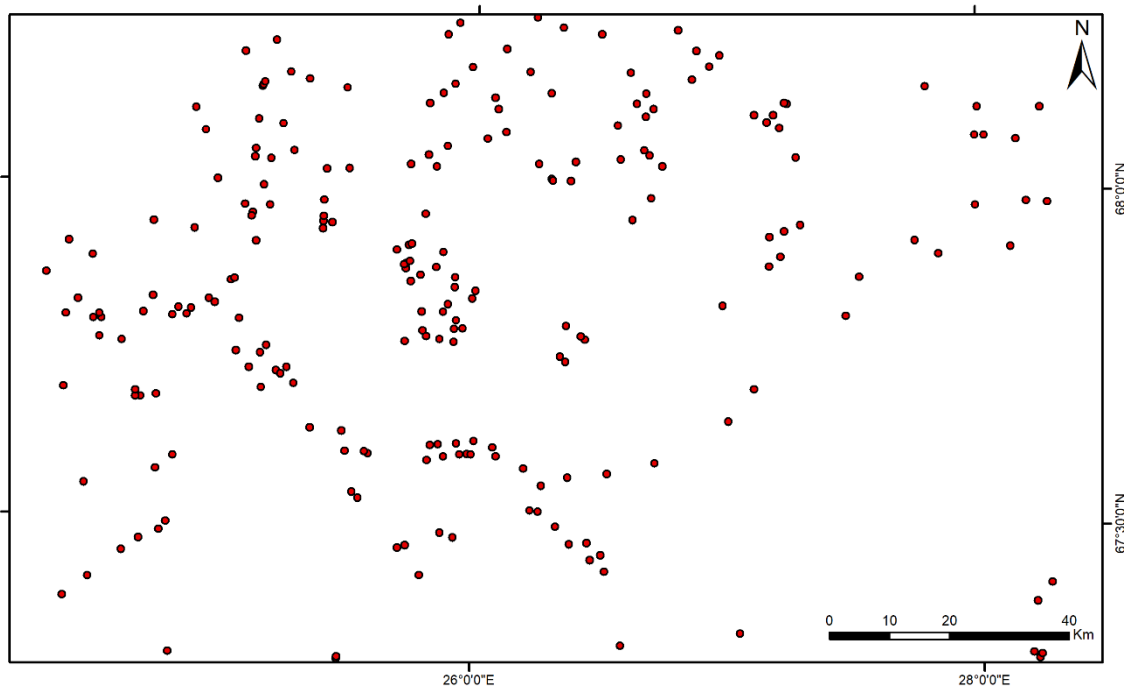
**Fig. 1.9.** Mapa dos pontos de interseção entre todos os lineamentos magnéticos interpretados para a região do *greenstone belt* Rio das Velhas



**Fig. 1.10.** Mapa de lineamentos magnéticos da área do *greenstone belt* Central Lapland, sem a aplicação de filtros direcionais



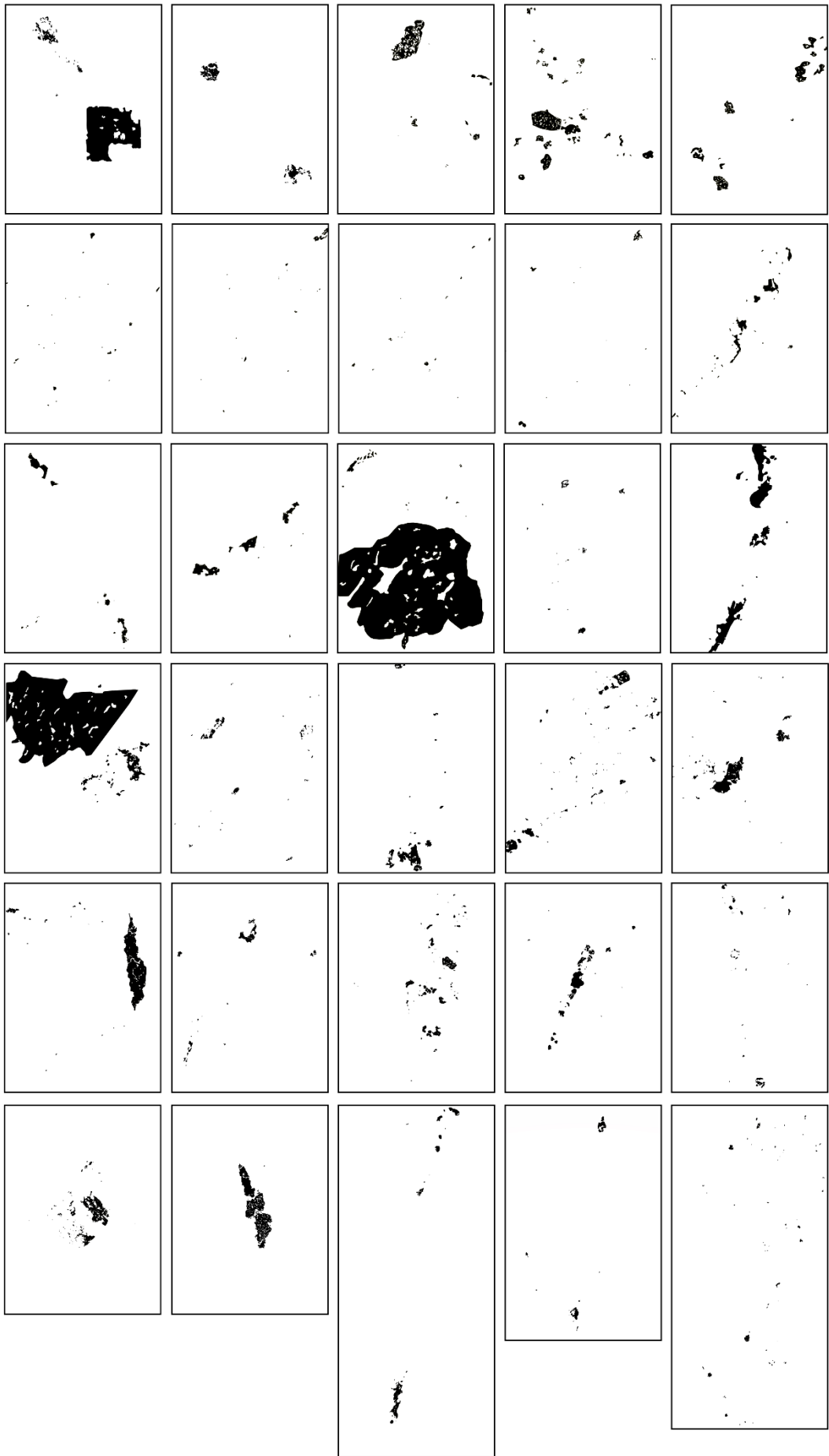
**Fig. 1.11.** Mapa de lineamentos magnéticos da área do *greenstone belt Central Lapland*, com a aplicação de filtros nas direções NNW-SSE, NNE-SSW, N-S e WNW-ESE (referências na tabela 1)



**Fig. 1.12.** Mapa dos pontos de interseção entre todos os lineamentos magnéticos interpretados para a região do *greenstone belt Central Lapland*

## 2. MAPAS BINÁRIOS DE MINERAIS DE MINÉRIO

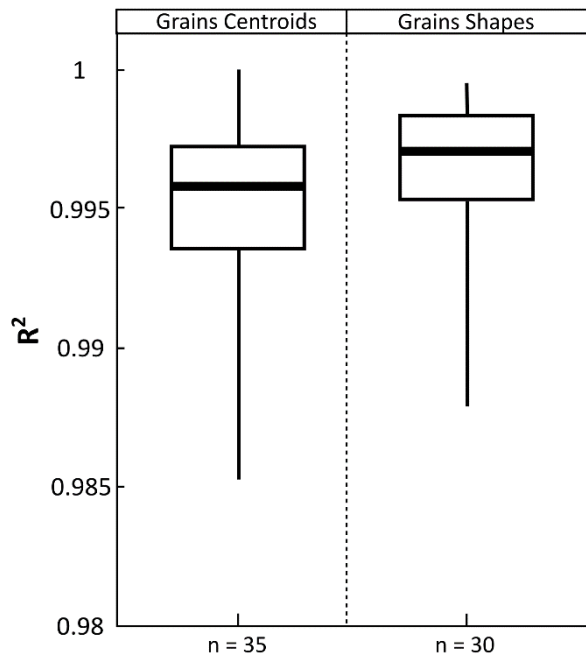
A partir das fotomicrografias das lâminas petrográficas orientadas, foram desenvolvidos mapas binários dos minerais relacionados à mineralização (Figura 2.1), no caso, a pirita e arsenopirita porosas e límpidas, a pirrotita e o ouro nativo. Estes mapas foram criados para permitir a sua análise de distribuição espacial e forma através dos algoritmos de *box-counting* e análise multifractal.



**Fig. 2.1.** Mapas binários dos minerais de minério de todas as 30 fotomicrografias orientadas obtidas nas amostras de testemunhos de sondagens mineralizadas. Os mapas foram desenvolvidos a partir da digitalização dos minerais relacionados à mineralização: pirita e arsenopirita limpa e porosa, pirrotita e ouro livre (Júnior et al. 2015; Porto 2008)

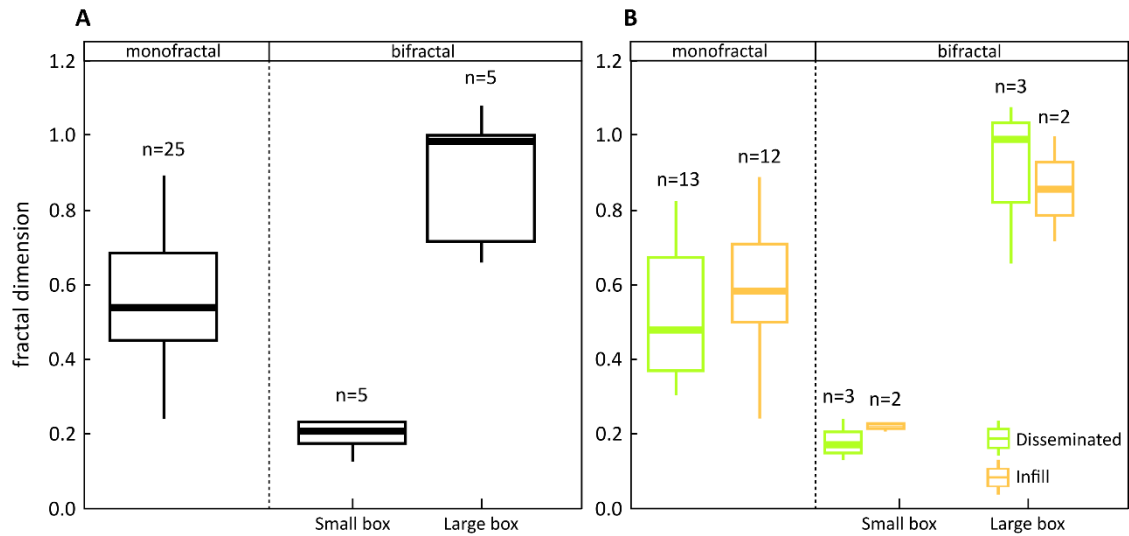
### 3. ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS MINERAIS

A análise da distribuição dos centroides dos grãos de sulfetos forneceu encaixes lineares nos gráficos log-log dos resultados do box-counting. Além disto, as regressões lineares indicaram valores de  $R^2$  superiores a 0,99 para a maioria das imagens (Figura 3.1). De acordo com Peternell and Kruhl (2009) isto é importante para caracterizar a existência de geometria fractal nas distribuições. Assim, foi possível constatar que a distribuição espacial das mineralizações em lâmina é fractal. Dentre os padrões analisados, apenas 3 apresentaram valores de  $R^2$  abaixo de 0,99, sendo um apenas na porção abaixo do ponto de quebra para um padrão bifractal, mas pode indicar que a geometria fractal não esteja presente nestas porções.



**Fig. 3.1.** Box-plots dos valores de  $R^2$  obtidos a partir das regressões lineares das análises fractais por *box-counting*

A maioria das análises ( $n=25$ ) indicou padrões monofractais e cinco mostraram padrão bifractal, com suas dimensões fractais indicadas como small e large box para os valores abaixo e acima dos pontos de quebra (Figura 3.2). No geral, os valores de dimensões fractais variam consideravelmente, em parte devido à existência de diferentes padrões de mineralização. Quando analisados separadamente, é possível observar diferenças entre as mineralizações disseminadas e venulares. A tabela 2 traz um resumo das dimensões fractais obtidas para os centroides dos minerais de minério em todas as imagens.



**Fig. 3.2.** Box-plots das dimensões fractais dos centroides dos grãos de sulfetos. (A) Todas as amostras; (B) Amostras separadas por tipo de mineralização

**Tabela 2.** Resumo das dimensões fractais obtidas para os centroides dos minerais de minério em todas as imagens

Analysis		Monofractals		Bifractals						
					Before Break Point			After Break Point		
		All	Diss.	Infill	All	Diss.	Infill	All	Diss.	Infill
Centroids	Range	0.24-0.89	0.31-0.82	0.24-0.89	0.13-0.24	0.13-0.24	0.21-0.23	0.66-1.08	0.66-1.08	0.72-1.00
Box-	Median	0.54	0.48	0.58	0.21	0.17	0.22	0.99	0.99	0.86
Counting	IQR	0.45-0.68	0.37-0.67	0.50-0.71	0.17-0.23	0.15-0.21	0.21-0.23	0.72-1.00	0.82-1.03	0.79-0.93

\*Diss.: Disseminated; IQR: Interquartile range



#### 4. ESPECTROS MULTIFRACTAIS DOS LINEAMENTOS MAGNÉTICOS

A seguir estão exibidos os espectros multifractais ( $f(\alpha)$  vs.  $\alpha$ ) obtidos para as quatro áreas do estudo regional. A figura 4.1 traz os resultados para todos os lineamentos magnéticos, enquanto a figura 4.2 mostra os espectros dos lineamentos filtrados nas direções favoráveis às mineralizações de ouro. Nota-se que as regiões de *Abitibi* e *Norseman-Wiluna* apresentam espectros mais abertos, ou seja, com maior variação de singularidade ( $\alpha$ ) e maior variação de  $f(\alpha)$  tanto nos lineamentos totais quanto nos filtrados. Outras observações sobre as informações obtidas nestes gráficos podem ser encontradas melhor exibidas na figura 5.23 e no corpo do artigo.

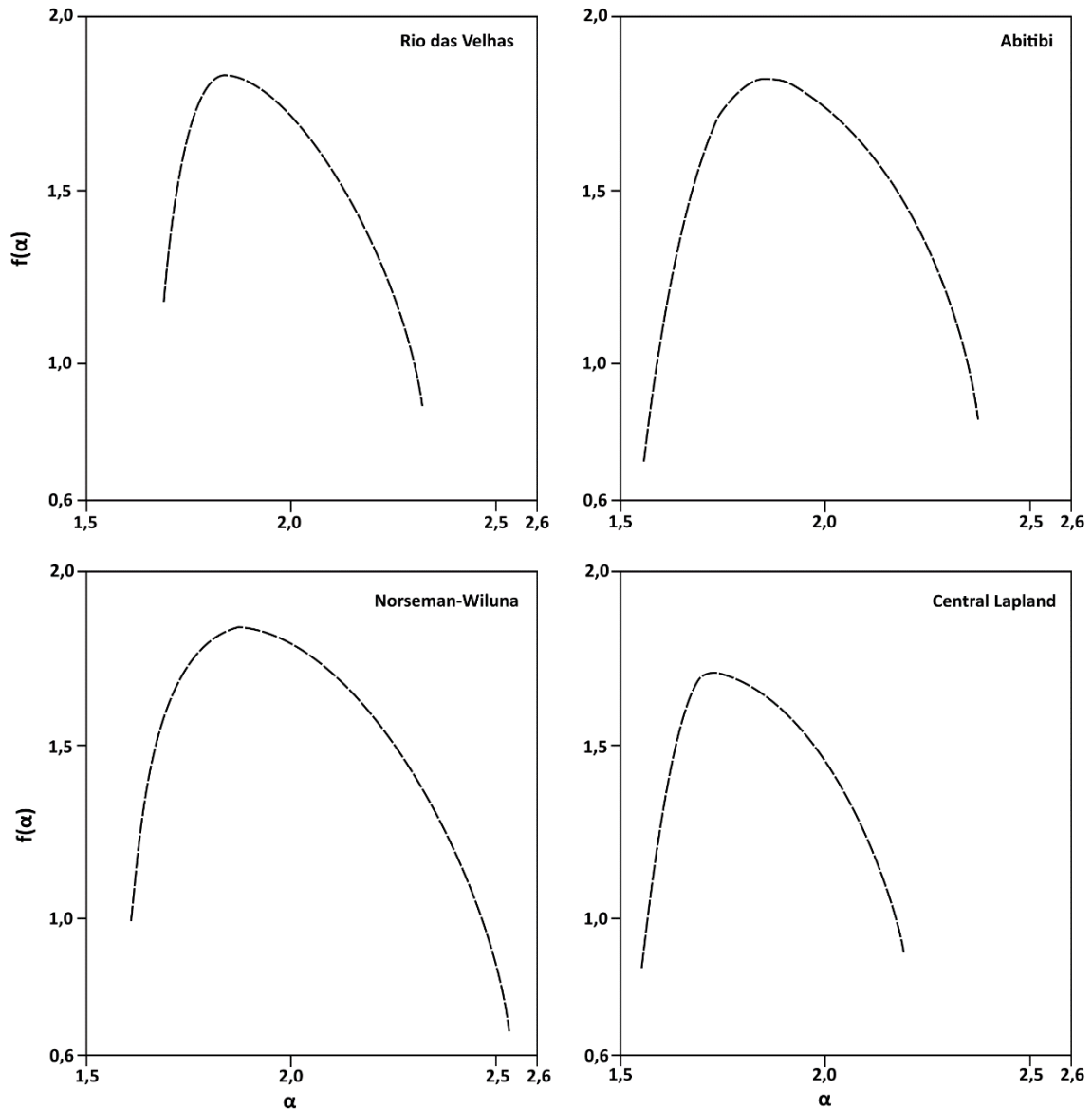
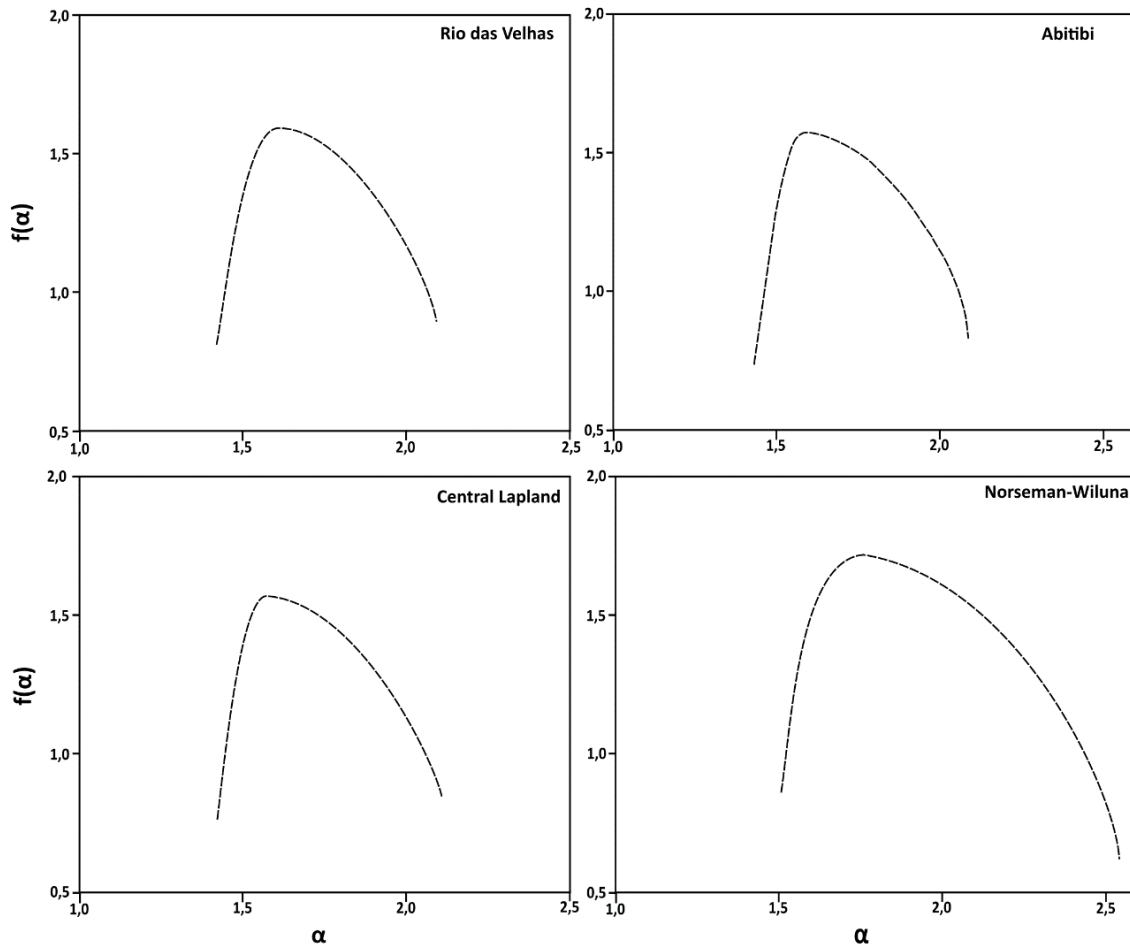


Fig. 4.1. Espectro multifractal  $f(\alpha)$  dos lineamentos magnéticos das quatro áreas de estudo



**Fig. 4.2.** Espectro multifractal  $f(\alpha)$  dos lineamentos magnéticos filtrados das quatro áreas de estudo

## REFERÊNCIAS

- Baltazar, O. F., & Zucchetti, M. (2007). Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 32(3–4), 471–499. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.03.021>
- Blewett, R. (2010). Archean gold mineral systems in the eastern Yilgarn Craton “Although the study was based on the Yilgarn Craton, the results have general implications for other Archean terranes and mineral systems .,” 1–8.
- Carranza, E. J. M. (2009). Controls on mineral deposit occurrence inferred from analysis of their spatial pattern and spatial association with geological features. *Ore Geology Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2009.01.001>
- Evertsz, C. J. G. and Mandelbrot, B. B.: Multifractal measures (Appendix B) [A]. In: Peitgen H-O, Jurgens H, Saupe D, eds. *Chaos and fractals*[C]. New York: Springer Verlag, 922–953, 1992

Gosselin, P., Dubé, B., Gosselin, P., & Dubé, B. (2005). Gold deposits of the world: distribution, geological parameters and gold content. Geological Survey of Canada, (Open File 4895), 271.

Groves, D. I., Santosh, M., Goldfarb, R. J., & Zhang, L. (2018). Structural geometry of orogenic gold deposits: Implications for exploration of world-class and giant deposits. *Geoscience Frontiers*, 9(4), 1163–1177. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.01.006>

Isles, D. J., & Rankin, L. R. (2013). Geological Interpretation of Aeromagnetic Data. Science (Vol. 147). Society of Exploration Geophysicists and Australian Society of Exploration Geophysicists. <https://doi.org/10.1190/1.9781560803218>

Júnior, J. G. R., Lobato, L. M., Lima, L. C., Porto, C. G., & Figueiredo E Silva, R. C. (2015). Metaturbidite-hosted gold deposits, córrego do sítio lineament, quadrilátero ferrífero, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 45(1), 5–22. <https://doi.org/10.1590/23174889201500010001>

Lima, L. C. (2012). GEOLOGIA DO DEPÓSITO LODE Au-As-Sb LARANJEIRAS, EM METATURBITOS DO GRUPO NOVA LIMA, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINAS GERAIS, BRASIL.

Ni, C., Zhang, S., Chen, Z., Yan, Y., & Li, Y. (2017). Mapping the Spatial Distribution and Characteristics of Lineaments Using Fractal and Multifractal Models: A Case Study from Northeastern Yunnan Province, China. *Scientific Reports*, 7(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11027-0>

Niiranen, T., Lahti, I., & Nykänen, V. (2015). The Orogenic Gold Potential of the Central Lapland Greenstone Belt, Northern Fennoscandian Shield. *Mineral Deposits of Finland*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410438-9.00028-5>

Percival, J. A. (2007). Geology and Metallogeny of the Superior Province, Canada. *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods Special Publication No. 5*, (X), 903–928.

Paternell, M., & Kruhl, J. H. (2009). Automation of pattern recognition and fractal-geometry-based pattern quantification, exemplified by mineral-phase distribution patterns in igneous rocks. *Computers and Geosciences*, 35(7), 1415–1426. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.11.001>

Porto, C. G. (2008). “A MINERALIZAÇÃO AURÍFERA DO DEPÓSITO CÓRREGO DO SÍTIO E SUA RELAÇÃO COM O ENXAME DE DIQUES METAMÁFICOS NO CORPO CACHORRO BRAVO – QUADRILÁTERO FERRÍFERO – MG.”

Sayab, M., Molnár, F., Aerden, D., Niiranen, T., Kuva, J., & Välimaa, J. (2019). A succession of near-orthogonal horizontal tectonic shortenings in the Paleoproterozoic Central Lapland Greenstone Belt of Fennoscandia: constraints from the world-class Suurikuusikko gold deposit. *Mineralium Deposita*. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00910-7>

Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietzsch, T., et al. (2012). Fiji: An open-source platform for biological-image analysis. *Nature Methods*, 9(7), 676–682. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2019>

### CAPÍTULO 3 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A demonstração do caráter fractal, ou seja, de lei de potência (*power-law*), da distribuição espacial das mineralizações de ouro orogênico em diferentes províncias ao redor do mundo, bem como das estruturas associadas, indicou semelhanças na atuação de processos distintos em escala crustal, distrital e local. A relação entre os mapas de dimensões fractais de lineamentos magnéticos, e os locais de ocorrência dos depósitos minerais, pode ser utilizada como critério prospectivo, ou seja, estes mapas podem servir como mapas evidenciais (Leite e Souza Filho 2009) em mapas de favorabilidade mineral (Carranza 2008) para outros locais com sistemas minerais que possuam controles estruturais e estratigráficos semelhantes. Já a caracterização do caráter multifractal destes lineamentos, originado pela atuação conjunta de diversos processos com caráter fractal intrínseco em sua formação, permitiu seu estudo através dos índices multifractais. Estes forneceram um critério quantitativo para uma análise comparativa entre as diferentes províncias minerais mundiais, tanto na relação entre os lineamentos magnéticos e a ocorrência dos depósitos minerais, quanto na dotação metalogenética de cada local. Também foi possível realizar comparações entre a escala regional e local, no estudo de caso desenvolvido no Lineamento Córrego do Sítio.

A análise da distribuição dos minerais de minério em lâmina indica sua geometria fractal. Nesse caso há a possibilidade de serem extrapolados os controles definidos nesta escala para escalas mais abrangentes, fornecendo informações úteis para a exploração de regiões pouco conhecidas e com poucos depósitos. A identificação de geometria multifractal em grande parte dos mapas binários de sulfetos em lâmina indica a atuação conjunta de mais de um processo com caráter fractal também nesta escala. A existência de amostras com caráter monofractal sugere a ação de um único processo de caráter fractal nestes casos. Todavia, considerando que, mesmo em microescala, deva ocorrer a interação de mais de um processo fractal, como variações de temperatura ou composição dos fluidos (Pearce et al. 2018), sinais multifractais não foram detectados nas formas dos minerais analisados. Entretanto, eventualmente podem ser detectados através de outras técnicas de análise multifractal, por exemplo, a análise por *wavelets* (Arneodo et al., 2008), que considera outros tipos de dados (e.g., variações elementares ou de teores, de temperaturas, pH/Eh). Mesmo assim, o uso dos índices multifractais mostra diferenças entre os dois principais tipos de mineralização estudados em Córrego do Sítio, disseminada ou venular, e pode ser útil na classificação de minérios em análise petrográfica, com potencial para uso combinado com métodos de análise com algoritmos de classificação não-supervisionada.

As discussões e interpretações desenvolvidas a partir dos resultados obtidos permitem afirmar que a análise fractal e multifractal são ferramentas úteis no estudo de depósitos minerais em diversas escalas, com a geração de produtos que podem auxiliar a prospecção de novos depósitos. Outras províncias e sistemas minerais hidrotermais com expressivo controle estrutural e estratigráfico podem ser alvo de pesquisas futuras com as mesmas técnicas.

## REFERÊNCIAS

- Agterberg, F.P., Cheng, Q., Brown, A., Good, D., 1996. Multifractal Modeling of Fractures in the Lac Du Bonnet Batholith, Manitoba 22, 497–507.
- Alkmim, F.F., Marshak, S., 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: Evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research* 90, 29–58. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(98\)00032-1](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(98)00032-1)
- Archibald, N., Gow, P., Boschetti, F., 1999. Multiscale edge analysis of potential field data\*, *Exploration Geophysics*.
- Arias, M., Gumiel, P., Sanderson, D.J., Martin-Izard, A., 2011. A multifractal simulation model for the distribution of VMS deposits in the Spanish segment of the Iberian Pyrite Belt. *Computers and Geosciences* 37, 1917–1927. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.07.012>
- Arnéodo, A., Decoster, N., Kestener, P., Roux, S.G., 2003. A wavelet-based method for multifractal image analysis: From theoretical concepts to experimental applications. *Advances in Imaging and Electron Physics* 126, 1–92. [https://doi.org/10.1016/S1076-5670\(03\)80014-9](https://doi.org/10.1016/S1076-5670(03)80014-9)
- Baltazar, O. F., & Zucchetti, M., 2007. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 32(3–4), 471–499. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.03.021>
- Bansal, A.R., Dimri, V.P., Kumar, R., Anand, S.P., 2016. Fractal Solutions for Understanding Complex Systems in Earth Sciences, *Fractal Solutions for Understanding Complex Systems in Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24675-8>
- Benn, K., Peschler, A.P., 2005. A detachment fold model for fault zones in the Late Archean Abitibi greenstone belt. *Tectonophysics* 400, 85–104. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.02.011>
- Blenkinsop, T.G., Sanderson, D.J., 1999. Are gold deposits in the crust fractals? A study of gold mines in the Zimbabwe craton. *Geological Society Special Publication* 155, 141–151. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.155.01.11>
- Blewett, R., 2010. Archean gold mineral systems in the eastern Yilgarn Craton “Although the study was based on the Yilgarn Craton, the results have general implications for other Archean terranes and mineral systems .,” 1–8.
- Blewett, R.S., Henson, P.A., Roy, I.G., Champion, D.C., Cassidy, K.F., 2010. Scale-integrated architecture of a world-class gold mineral system: The Archaean eastern Yilgarn Craton, Western Australia. *Precambrian Research* 183, 230–250. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.06.004>
- Boots, B.N., Getis, A., 1988. *Point Pattern Analysis*.

- Carlson, C.A., 1991. Spatial distribution of ore deposits. *Geology* 19, 111–114. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0111:SDOOD>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0111:SDOOD>2.3.CO;2)
- Carranza E.J.M., 2008. *Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS*. Amsterdam, Elsevier B.V., 366 p.
- Carranza, E. J. M., 2009. Controls on mineral deposit occurrence inferred from analysis of their spatial pattern and spatial association with geological features. *Ore Geology Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2009.01.001>
- Carranza, E.J.M., de Souza Filho, C.R., Haddad-Martim, P.M., Nagayoshi, K., Shimizu, I., 2019. Macro-scale ore-controlling faults revealed by micro-geochemical anomalies. *Scientific Reports* 9, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41019-1>
- Chainais, P., 2006. Multidimensional infinitely divisible cascades: Application to the modelling of intermittency in turbulence. *European Physical Journal B* 51, 229–243. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2006-00213-y>
- Cheng, Q., 1999. Multifractality and spatial statistics 25, 949–961.
- Cordell, L., Grauch, V.J.S., 1985. 16. Mapping Basement Magnetization Zones from Aeromagnetic Data in the San Juan Basin, New Mexico, in: *The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomaly Maps*. Society of Exploration Geophysicists, pp. 181–197. <https://doi.org/10.1190/1.0931830346.ch16>
- Czarnota, K., Champion, D.C., Goscombe, B., Blewett, R.S., Cassidy, K.F., Henson, P.A., Groenewald, P.B., 2010. Geodynamics of the eastern Yilgarn Craton. *Precambrian Research* 183, 175–202. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.08.004>
- Deng, B., Liu, S., Jansa, L., Yong, S., Zhang, Z., 2014. Fractal analysis of veins in Permian carbonate rocks in the Lingtanchang anticline, western China. *Geofluids* 14, 160–173. <https://doi.org/10.1111/gfl.12059>
- Deng, J., Wang, Q., Wan, L., Liu, H., Yang, L., Zhang, J., 2011. A multifractal analysis of mineralization characteristics of the Dayingezhuang disseminated-veinlet gold deposit in the Jiaodong gold province of China. *Ore Geology Reviews* 40, 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.05.001>
- Dorr, J.V.N., 1969. *Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero Minas Gerais, Brazil*, Geological Survey Professional Paper.
- Doutre, C., 2017. Multi-scale organisation and geological controls on large orogenic gold deposits 1–142.
- Elmer, F.L., Powell, R., White, R.W., Phillips, G.N., 2007. Timing of gold mineralization relative to the peak of metamorphism at Bronzewing, Western Australia. *Economic Geology* 102, 379–392. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.3.379>

Evertsz, C. J. G. and Mandelbrot, B. B.: Multifractal measures (Appendix B) [A]. In: Peitgen H-O, Jurgens H, Saupe D, eds. *Chaos and fractals*[C]. New York: Springer Verlag, 922–953, 1992

Farina, F., Albert, C., Martínez Dopico, C., Aguilar Gil, C., Moreira, H., Hippertt, J.P., Cutts, K., Alkmim, F.F., Lana, C., 2016. The Archean–Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Brasil): Current models and open questions. *Journal of South American Earth Sciences* 68, 4–21. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.10.015>

Ferreira, F.J.F., de Souza, J., Bongioiolo, A. de B. e. S., de Castro, L.G., 2013. Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle. *Geophysics* 78, J33–J41. <https://doi.org/10.1190/geo2011-0441.1>

Ford, A., 2007. Application of fractal and multifractal analysis to the Mount Isa Inlier.

Fry, N., 1979. Random point distributions and strain measurement in rocks. *Tectonophysics* 60, 89–105. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(79\)90135-5](https://doi.org/10.1016/0040-1951(79)90135-5)

Gaboury, D., 2019. Parameters for the formation of orogenic gold deposits. *Applied Earth Science: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy* 128, 124–133. <https://doi.org/10.1080/25726838.2019.1583310>

Gosselin, P., Dubé, B., Gosselin, P., & Dubé, B., 2005. Gold deposits of the world: distribution, geological parameters and gold content. Geological Survey of Canada, (Open File 4895), 271.

Grohmann, C.H., Campanha, G.A.C. and Soares Junior, A.V., 2011. OpenStereo: um programa Livre e multiplataforma para análise de dados estruturais. In: XIII Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos.

Groves, D.I., Barley, M.E., Shepherd, J.M., 1994. OVERVIEWS: Geology and mineralisation of Western Australia. *ASEG Extended Abstracts 1994*, 1–28. [https://doi.org/10.1071/ASEGSpec07\\_02](https://doi.org/10.1071/ASEGSpec07_02)

Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G., Robert, F., 1998. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews* 13, 7–27. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(97\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(97)00012-7)

Groves, D. I., Santosh, M., Goldfarb, R. J., & Zhang, L., 2018. Structural geometry of orogenic gold deposits: Implications for exploration of world-class and giant deposits. *Geoscience Frontiers*, 9(4), 1163–1177. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.01.006>

Groves, D.I., Santosh, M., Deng, J., Wang, Q., Yang, L., Zhang, L., 2020. A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration. *Mineralium Deposita* 55, 275–292. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00877-5>

Gumiel, P., Sanderson, D.J., Arias, M., Roberts, S., Martín-izard, A., 2010. Analysis of the fractal clustering of ore deposits in the Spanish Iberian Pyrite Belt. *Ore Geology Reviews* 38, 307–318. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.08.001>



- Haddad-Martim, P.M., Souza Filho, C.R. de, Carranza, E.J.M., 2017. Spatial analysis of mineral deposit distribution: A review of methods and implications for structural controls on iron oxide-copper-gold mineralization in Carajás, Brazil. *Ore Geology Reviews* 81, 230–244. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.038>
- Haddad-Martim, P.M., Carranza, E.J.M., De Souza Filho, C.R., 2018. The fractal nature of structural controls on ore formation: The Case of the Iron oxide copper-gold deposits in the carajás mineral province, Brazilian amazon. *Economic Geology* 113, 1499–1524. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4600>
- Halsey, T.C., Jensen, M.H., Kadanoff, L.P., Procaccia, I., Shraiman, B.I., 1987. Fractal measures and their singularities: The characterization of strange sets. *Nuclear Physics B (Proceedings Supplements)* 2, 501–511. [https://doi.org/10.1016/0920-5632\(87\)90036-3](https://doi.org/10.1016/0920-5632(87)90036-3)
- Hanski, E., Huhma, H., 2005. Chapter 4 Central Lapland greenstone belt, in: *BMC Public Health*. pp. 139–193. [https://doi.org/10.1016/S0166-2635\(05\)80005-2](https://doi.org/10.1016/S0166-2635(05)80005-2)
- Heilbronner, R., 2015. Image analysis in earth sciences, *Geotectonic Research*. <https://doi.org/10.1127/1864-5658/2015-56>
- Hobbs, B.E., Ord, A., 2018. Episodic modes of operation in hydrothermal gold systems: Part II. A model for gold deposition. *Geological Society Special Publication* 453, 147–164. <https://doi.org/10.1144/SP453.15>
- Hodkiewicz, P.F., Weinberg, R.F., Gardoll, S.J., Groves, D.I., 2005. Complexity gradients in the Yilgarn Craton: Fundamental controls on crustal-scale fluid flow and the formation of world-class orogenic-gold deposits. *Australian Journal of Earth Sciences* 52, 831–841. <https://doi.org/10.1080/08120090500304257>
- Isles, D. J., & Rankin, L. R., 2013. *Geological Interpretation of Aeromagnetic Data. Science (Vol. 147)*. Society of Exploration Geophysicists and Australian Society of Exploration Geophysicists. <https://doi.org/10.1190/1.9781560803218>
- Júnior, J. G. R., Lobato, L. M., Lima, L. C., Porto, C. G., & Figueiredo E Silva, R. C., 2015. Metaturbidite-hosted gold deposits, córrego do sítio lineament, quadrilátero ferrífero, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 45(1), 5–22. <https://doi.org/10.1590/23174889201500010001>
- Karperien, A., 2013. FracLac for ImageJ. <http://rsb.info.nih.gov/ij/plugins/fractal/FLHelp/Introduction.htm>
- Kreuzer, O.P., Blenkinsop, T.G., Morrison, R.J., Peters, S.G., 2007. Ore controls in the Charters Towers goldfield, NE Australia: Constraints from geological, geophysical and numerical analyses. *Ore Geology Reviews* 32, 37–80. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.12.001>
- Kruhl, J.H., 2013. Fractal-geometry techniques in the quantification of complex rock structures: A special view on scaling regimes, inhomogeneity and anisotropy. *Journal of Structural Geology* 46, 2–21. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.10.002>

- Ladyman, J., Lambert, J., Wiesner, K., 2013. What is a complex system? *European Journal for Philosophy of Science*. <https://doi.org/10.1007/s13194-012-0056-8>
- Leite E.P. and Souza Filho C.R. de., 2009. Artificial neural networks applied to mineral potential mapping for copper-gold mineralizations in the Carajás Mineral Province, Brazil. *Geophysical Prospecting*, 57(6):1049–1065.
- Lester, D.R., Ord, A., Hobbs, B.E., 2012. The mechanics of hydrothermal systems: II. Fluid mixing and chemical reactions. *Ore Geology Reviews* 49, 45–71. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.08.002>
- Lima, L.C., 2012. Geologia do depósito lode Au-As-Sb Laranjeiras, em metaturbitos do Grupo Nova Lima, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil.
- Lisitsin, V., 2015. Spatial data analysis of mineral deposit point patterns: Applications to exploration targeting. *Ore Geology Reviews* 71, 861–881. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.05.019>
- Lobato, L.M., Ribeiro-Rodrigues, L.C., Vieira, F.W.R., 2001. Brazil's premier gold province. Part II: geology and genesis of gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita* 36, 249–277. <https://doi.org/10.1007/s001260100180>
- Mamtani, M.A., 2012. Fractal analysis of magnetite grains — implications for interpreting deformation mechanism. *Journal of the Geological Society of India* 80, 308–313. <https://doi.org/10.1007/s12594-012-0149-1>
- Mandelbrot, B., 1983. The fractal geometry of nature.
- Martins, R., 2017. Cuiabá Gold Mine – Exploration Success in a Mature Greenstone Belt – Iron Quadrangle – MG – Brazil, PDAC 2017 – Brazilian Mining Day
- Mccuaig, T.C., Beresford, S., Hronsky, J., 2010. Translating the mineral systems approach into an effective exploration targeting system. *Ore Geology Reviews* 38, 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.05.008>
- Miller, H.G., Singh, V., 1994. Potential field tilt a new concept for location of potential field sources, *Journal of Applied Geophysics*.
- Munro, M.A., Ord, A., Hobbs, B.E., 2018. Spatial organization of gold and alteration mineralogy in hydrothermal systems: Wavelet analysis of drillcore from Sunrise Dam Gold Mine, Western Australia. *Geological Society Special Publication* 453, 165–204. <https://doi.org/10.1144/SP453.10>
- Nabighian, M.N., 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation, *Geophysics*.
- Ni, C., Zhang, S., Chen, Z., Yan, Y., & Li, Y., 2017. Mapping the Spatial Distribution and Characteristics of Lineaments Using Fractal and Multifractal Models: A Case Study from Northeastern Yunnan Province, China. *Scientific Reports*, 7(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11027-0>

Niiranen, T., Lahti, I., & Nykänen, V., 2015. The Orogenic Gold Potential of the Central Lapland Greenstone Belt, Northern Fennoscandian Shield. *Mineral Deposits of Finland*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410438-9.00028-5>

Oliveira, P.M., 2019. Assinaturas magnéticas e gravimétricas das intrusões de lamproítos da Província Diamantífera Oeste de Kimberley, Austrália Ocidental. Unicamp.

Ord, A., Hobbs, B.E., 2018. Episodic modes of operation in hydrothermal gold systems: Part I. Deformation, mineral reactions and chaos. *Geological Society Special Publication* 453, 121–146. <https://doi.org/10.1144/SP453.14>

Ord, A., Hobbs, B.E., Lester, D.R., 2012. The mechanics of hydrothermal systems: I. Ore systems as chemical reactors. *Ore Geology Reviews* 49, 1–44. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.08.003>

Ord, A., Munro, M., Hobbs, B., 2016. Hydrothermal mineralising systems as chemical reactors: Wavelet analysis, multifractals and correlations. *Ore Geology Reviews* 79, 155–179. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.03.026>

Pearce, M. A., Godel, B. M., Fisher, L. A., Schoneveld, L. E., Cleverley, J. S., Oliver, N. H. S., & Nugus, M., 2018. Microscale data to macroscale processes: A review of microcharacterization applied to mineral systems. *Geological Society Special Publication*, 453(1), 7–39. <https://doi.org/10.1144/SP453.3>

Percival, J.A., 2007. *Geology and Metallogeny of the Superior Province, Canada. Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods Special Publication No. 5* 903–928.

Pereira, M.A.S., Lobato, L.M., Rosière, C.A., Figueiredo e Silva, R.C., 2013. Classificação Dos Veios Quartzo-Carbonáticos De Depósitos Auríferos No Lineamento Córrego Do Sítio, Qf, Mg. *Geonomos*. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v21i2.272>

Peternell, M., Kruhl, J.H., 2009. Automation of pattern recognition and fractal-geometry-based pattern quantification, exemplified by mineral-phase distribution patterns in igneous rocks. *Computers and Geosciences* 35, 1415–1426. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.11.001>

Phillips, G.N., Powell, R., 2010. Formation of gold deposits: A metamorphic devolatilization model. *Journal of Metamorphic Geology* 28, 689–718. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2010.00887.x>

Pirajno, F., 2016. A classification of mineral systems, overviews of plate tectonic margins and examples of ore deposits associated with convergent margins. *Gondwana Research* 33, 44–62. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.08.013>

Pitcairn, I.K., Teagle, D.A.H., Craw, D., Olivo, G.R., Kerrich, R., Brewer, T.S., 2006. Sources of metals and fluids in orogenic gold deposits: Insights from the Otago and Alpine schists, New Zealand. *Economic Geology* 101, 1525–1546. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.101.8.1525>

Porto, C.G., 2008. “A mineralização aurífera do depósito Córrego do Sítio e sua relação com o enxame de diques metamáficos no corpo Cachorro Bravo – Quadrilátero Ferrífero – MG.”

Prado, E.M.G., de Souza Filho, C.R., Carranza, E.J.M., Motta, J.G., 2020. Modeling of Cu-Au prospectivity in the Carajás mineral province (Brazil) through machine learning: Dealing with imbalanced training data. *Ore Geology Reviews* 124, 103611. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103611>

Raines, G.L., 2008. Are fractal dimensions of the spatial distribution of mineral deposits meaningful? *Progress in Geomathematics* 17, 285–301. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-69496-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69496-0_13)

Reich, M., Kesler, S.E., Utsunomiya, S., Palenik, C.S., Chryssoulis, S.L., Ewing, R.C., 2005. Solubility of gold in arsenian pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69, 2781–2796. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.01.011>

Sayab, M., Molnár, F., Aerden, D., Niiranen, T., Kuva, J., Välimaa, J., 2019. A succession of near-orthogonal horizontal tectonic shortenings in the Paleoproterozoic Central Lapland Greenstone Belt of Fennoscandia: constraints from the world-class Suurikuusikko gold deposit. *Mineralium Deposita*. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00910-7>

Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietzsch, T., Preibisch, S., Rueden, C., Saalfeld, S., Schmid, B., Tinevez, J.Y., White, D.J., Hartenstein, V., Eliceiri, K., Tomancak, P., Cardona, A., 2012. Fiji: An open-source platform for biological-image analysis. *Nature Methods* 9, 676–682. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2019>

Sornette, D., 2004. *Critical Phenomena in Natural Sciences: Chaos, Fractals*.

Sun, T., Chen, F., Zhong, L., Liu, W., Wang, Y., 2019. GIS-based mineral prospectivity mapping using machine learning methods: A case study from Tongling ore district, eastern China. *Ore Geology Reviews* 109, 26–49. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.04.003>

Swain, S.K., Roy, P.N.S., Mukherjee, B., Sawkar, R.H., 2019. Fractal dimension and its translation into a model of gold spatial proxy. *Ore Geology Reviews* 110, 102935. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.102935>

Teixeira, W., Ávila, C.A., Dussin, I.A., Corrêa Neto, A. V., Bongioiolo, E.M., Santos, J.O., Barbosa, N.S., 2015. A juvenile accretion episode (2.35-2.32Ga) in the Mineiro belt and its role to the Minas accretionary orogeny: Zircon U-Pb-Hf and geochemical evidences. *Precambrian Research* 256, 148–169. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.11.009>

Thévenaz, P., Unser, M., 2007. User-friendly semiautomated assembly of accurate image mosaics in microscopy. *Microscopy Research and Technique* 70, 135–146. <https://doi.org/10.1002/jemt.20393>

Thompson, D.T., 1982. EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *GEOPHYSICS* 47, 31–37. <https://doi.org/10.1190/1.1441278>

Tomkins, A.G., 2013. On the source of orogenic gold. *Geology* 41, 1255–1256. <https://doi.org/10.1130/focus122013.1>

Turcotte, D.L., 1989. Fractals in Geology and Geophysics. *PAGEOPH* 131.

Vearncombe, J., Zelic, M., 2015. Structural paradigms for gold: Do they help us find and mine? *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section B: Applied Earth Science* 124, 2–19. <https://doi.org/10.1179/1743275815Y.0000000003>

Wang, Q., Deng, J., Liu, H., Yang, L., Wan, L., Zhang, R., 2010. Fractal models for ore reserve estimation. *Ore Geology Reviews* 37, 2–14. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2009.11.002>

Wang, Z., Cheng, Q., Cao, L., Xia, Q., Chen, Z., 2007. Fractal modelling of the microstructure property of quartz mylonite during deformation process. *Mathematical Geology* 39, 53–68. <https://doi.org/10.1007/s11004-006-9065-5>

Witt, W.K., Cassidy, K.F., Lu, Y.J., Hagemann, S.G., 2020. The tectonic setting and evolution of the 2.7 Ga Kalgoorlie–Kurnalpi Rift, a world-class Archean gold province. *Mineralium Deposita* 55, 601–631. <https://doi.org/10.1007/s00126-017-0778-9>

Xie, S., Bao, Z., 2004. Fractal and multifractal properties of geochemical fields. *Mathematical Geology* 36, 847–864. <https://doi.org/10.1023/B:MATG.0000041182.70233.47>

Xie, S., Cheng, Q., Zhang, S., Huang, K., 2010. Assessing microstructures of pyrrhotites in basalts by multifractal analysis. *Nonlinear Processes in Geophysics* 17, 319–327. <https://doi.org/10.5194/npg-17-319-2010>

Zhao, J., Chen, S., Zuo, R., Carranza, E.J.M., 2011. Mapping complexity of spatial distribution of faults using fractal and multifractal models: Vectoring towards exploration targets. *Computers and Geosciences* 37, 1958–1966. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.04.007>

Zuo, R., Cheng, Q., Xia, Q., Agterberg, F.P., 2009. Application of fractal models to distinguish between different mineral phases. *Mathematical Geosciences* 41, 71–80. <https://doi.org/10.1007/s11004-008-9191-3>