

**Jean Braga**

**Utilização de análise composicional de componentes principais na  
identificação de elementos farejadores – Um estudo de caso nos  
depósitos de ouro tipo Carlin no norte de Nevada, Estados Unidos**

**Trabalho Final de Curso  
(Geologia)**

UFRJ

Rio de Janeiro

2018



UFRJ

Jean Braga Bueno Reis

Utilização de análise composicional de componentes principais na identificação de elementos farejadores – Um estudo de caso nos depósitos de ouro tipo Carlin no norte de Nevada, Estados Unidos

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

Orientador:

Luis Paulo Vieira Braga

Rio de Janeiro

Dezembro de 2018

Jean Braga Bueno Reis

Utilização de análise composicional de componentes principais na identificação de elementos farejadores – Um estudo de caso nos depósitos de ouro tipo Carlin no norte de Nevada, Estados Unidos / Jean Braga Bueno Reis - - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2018.

45 p.: il.; 30cm

Trabalho Final de Curso (Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2018.

Orientador: Luis Paulo Vieira Braga

1. Geologia. 2. Geologia Regional e Econômica – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Luis Paulo Vieira Braga. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. Utilização de análise composicional de componentes principais na identificação de elementos farejadores de ouro tipo Carlin no norte de Nevada, Estados Unidos

Jean Braga Bueno Reis

Utilização de análise composicional de componentes principais na identificação de elementos farejadores de ouro tipo Carlin no norte de Nevada, Estados Unidos

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

Orientador:

Luis Paulo Vieira Braga

Aprovada em:

Por:

---

Orientador: Luis Paulo Vieira Braga (UFRJ)

---

José Carlos Sicoli Seoane (UFRJ)

---

Luis Iván Ortiz Valencia (Idados)

UFRJ

Rio de Janeiro

2018

Dedico este trabalho à minha mãe.

### **Agradecimentos**

À minha mãe por todo o apoio e paciência durante não apenas esta época, mas toda a minha vida até este momento.

À minha família, que muito me apoiou.

Ao meu professor e orientador Luis Paulo Vieira Braga pela oportunidade de desenvolver e aprender com este trabalho, do qual muito me orgulho.

Aos amigos Marcelo, Rafael, Inoã e José pelo apoio e por tantos questionamentos dos mais diversos sobre o texto, os quais foram respondidos com a maior paciência

Também aos amigos Álvaro, Ana Clara, Pietro e Rodrigo pela paciência e disponibilidade em responder as minhas questões mais bobas sobre geologia e ArcGIS.

Ao David Handerson Coelho.

E em especial à Aline Alonso, Diego Martins, Karen Stelzer, Raphael Paiva, Rafael Vieira, Raissa Rotolo, Taynã Martins, Robson Duarte e Guilherme Menegucci, motivos do meu sorriso, por todo o apoio e carinho recebido durante as horas mais sombrias deste ano.

## Resumo

BRAGA, Jean. Utilização de análise composicional de componentes principais na identificação de elementos farejadores – Um estudo de caso nos depósitos de ouro tipo Carlin no norte de Nevada, Estados Unidos. 2018. 45 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

A utilização de metais farejadores vem sendo empregada com sucesso relativo, uma vez que baixas concentrações, intemperismo, localização do depósito, entre outras razões, dificultam a fixação do objetivo. Os métodos clássicos, utilizando estatística multivariada, são limitados e não conseguem dar bons resultados em depósitos mais ocultos, tornando necessária a máxima utilização da informação disponível. Nesse trabalho, utiliza-se análise composicional aplicada a análise de componentes principais para identificar, de forma mais eficiente, elementos farejadores de ouro tipo Carlin, de forma a reforçar o sinal geoquímico dos mesmos. O procedimento é aplicado em cerca de 150 amostras de uma base de dados geoquímicos abertos, do Serviço Geológico dos Estados Unidos da América (U.S. Geological Survey). A área de estudo se concentrou ao norte do estado de Nevada, onde estão localizados os principais distritos de depósitos de ouro do tipo Carlin (*Carlin-type gold deposits*, CTGD's), mais especificamente no chamado *northern Carlin trend*, onde se concentram minas importantes como Meikle, Carlin e Bootstrap. Os dados foram tratados com o “compositions” e “Robcompositions”, pacotes do software R®. As etapas básicas foram: 1. Análise Exploratória dos dados; 2. Cálculo de composições; 3. Análise Composicional de Componentes Principais; 4. Seleção de Subcomposições; 5. Cálculo da importância relativa (*balances*). Os estudos confirmaram a importância do antimônio (Sb) em contraposição ao nióbio (Nb) nas amostras da região, para reforçar o sinal geoquímico. Isso é observado no gráfico *biplot* composicional, cuja interpretação difere daquela do *biplot* clássico. As distâncias entre as extremidades dos vetores variáveis são determinantes para a proporcionalidade entre elas. Nesse caso observa-se que o antimônio está muito próximo do ouro e o nióbio, muito afastado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ouro tipo Carlin, elementos farejadores, sinal geoquímico, análise composicional, análise de componentes principais.

## Abstract

BRAGA, Jean. Using principal components compositional analysis to identify pathfinder elements – A case study on Carlin-type gold deposits in northern Nevada, US. 2018. 45 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

The use of pathfinder metals has been employed with relative success, to some extent, since low concentrations, weathering, deposit locations, among other factors, makes pinpointing targets harder. Classical methods, using multivariate statistics are limited and do not yield good results on harder to reach deposits, making the proper usage of the available information of utmost importance. In this work, compositional analysis is used along principal components analysis, to identify pathfinder elements for Carlin-type gold deposits more efficiently, as a mean to strengthen their geochemical signals. The method is applied to 150 samples from the United States Geological Survey database. The area of study focused on the northern part of the state of Nevada, where several Carlin-type gold districts are placed. More specifically in the northern Carlin trend, which houses important mining complexes such as Meikle, Carlin and Bootstrap. The data were treated with the “compositions” and “Robcompositions” packages for R<sup>®</sup>. The basic steps were: 1. Exploratory analysis of data; 2. Calculating compositions; 3. Principal components compositional analysis; 4. Selection of subcompositions; 5. Estimating relative importance (balances). The results have shown the importance of antimony (Sb) as a positive correlation with gold and niobium (Nb) as it's counterpart, strengthening their geochemical signals. This result can be observed in the compositional biplot, which differs from a classic approach. The distances between vector extremities are related to the proportionality between those elements. In this case, antimony's vector is closely related to gold's, while niobium is pointed at the opposite direction.

**KEYWORDS:** Carlin-type gold, pathfinder elements, geochemical signal, compositional analysis, principal components analysis.



## Lista de figuras

Figura 1– Mapa de localização da área de estudo no estado de Nevada, EUA.....	4
Figura 2 - Linha temporal dos eventos que iniciaram a orogenia Antler (A e B) e os eventos subsequentes, pré orogenia Golconda. Retirado de Speed & Sleep, (1982) .....	8
Figura 3 - Figura mostrando a posição da sequência Havallah sobre as rochas erodidas da orogenia Antler, na porção central de Nevada. Retirado de Dickinson et al. (1983).....	9
Figura 4 - Mapa geológico e legenda da região do estado onde estão localizadas as áreas A e B. Modificado de Stewart & Carlson (1978).....	11
Figura 5 – Coluna estratigráfica do <i>trend</i> norte de Carlin, localizado na área B selecionada. Retirado de Emsbo et al. (2003). .....	12
Figura 6 – Seção geológica simplificada da região da mina de Meikle, localizada no <i>trend</i> norte de ouro tipo Carlin. Retirado de Emsbo et al. (2003) .....	13
Figura 7 – Imagem de satélite (retirada da base de mapas online do ArcMap, créditos: DigitalGlobe) com as áreas A e B delimitadas, mostrando a posição das minas de ouro tipo Carlin presentes na região.....	17
Figura 8 - Região do estado de Nevada com diversos trends de minas de ouro tipo Carlin representadas, incluindo o <i>trend</i> Carlin norte escolhido com a área "mineralizada" para o trabalho. Modificado de Patterson & Muntean (2011).....	18
Figura 9 - Exemplo de diagrama ternário das composições para os elementos Nb, As e Sb, em outra base de dados, obtido com o pacote compositions no R. Os traços vermelhos indicam teores abaixo do limite de detecção para aquele elemento. ....	23
Figura 10 – Boxplot para cada elemento nas áreas A e B. Ag, Al, As e Au, foram multiplicados por $10^4$ , $10^{-1}$ , $10^2$ e $10^6$ , respectivamente. ....	27
Figura 11 - Boxplot para cada elemento nas áreas A e B. Be, Bi, Cd e Ce foram multiplicados por $10^4$ , $10^4$ , $10^4$ e $10^3$ , respectivamente.....	28
Figura 12 – Boxplot para cada elemento nas áreas A e B. Co, Cu e Ga foram multiplicados por $10^3$ , enquanto Cr foi multiplicado por 200.....	28
Figura 13 – Boxplot para cada elemento nas áreas A e B. Mn foi multiplicado por 30, enquanto La e Li foram multiplicados por $10^3$ .....	29
Figura 14 – Boxplot para cada elemento nas áreas A e B. Mo e Nb foram multiplicados por $10^3$ , enquanto Ni foi multiplicado por 100 e Pb, por 10.....	29
Figura 15 – Boxplot para cada elemento nas áreas A e B. Pb foi multiplicado por 25, enquanto Sb, Sc e Sn, por 100.....	30
Figura 16 – Boxplot para cada elemento nas áreas A e B. Th e Y foram multiplicados por 100, enquanto V e Zn foram multiplicados por 10.....	30
Figura 17 - PCA composicional das amostras A e B em conjunto. ....	33

Figura 18 - Diagrama ternário composicional mostrando a influência de cada composição entre si. ....	35
Figura 19 - Dispersograma apresentando a relação entre os teores de ouro (Au) e os valores do score, calculado pelo balance entre Sb e Nb. ....	36
Figura 20 - Bubble plot mostra as diferenças entre as áreas A e B baseado no sinal geoquímico expresso como o balance de Sb sobre Nb, aplicada uma correção de +1 no score. ....	37
Figura 21 - Mapa da região de Nevada onde se concentram os <i>trends</i> de minas tipo Carlin, mostrando a área C em amarelo. Modificado de Patterson & Muntean (2011) .....	42

## Lista de tabelas

Tabela 1: Sumário (em ppm) para as análises geoquímicas da área A.....	25
Tabela 2: Sumário (em ppm) para as análises geoquímicas da área B.....	26
Tabela 3: Teste de Wilcoxon comparando o par de amostras (área A e B) para cada elemento. Se o teste aceita $H_0$ (p-value $>10^{-5}$ ), as amostras se comportam da mesma forma. Se o teste rejeita $H_0$ (p-value $<10^{-5}$ ), as amostras são heterogêneas.....	31
Tabela 4: Tabela listando as médias das composições (center) e a matriz de variação de cada elemento em relação ao ouro (Au).....	32

## Sumário

Resumo .....	VII
Abstract.....	VIII
Lista de figuras .....	IX
Lista de tabelas .....	XI
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO.....	3
3. LOCALIZAÇÃO, ACESSOS E ASPECTOS FÍSIOGRÁFICOS.....	4
3.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSOS.....	4
3.2 ASPECTOS FÍSIOGRÁFICOS .....	5
3.2.1 RELEVO.....	5
3.2.2 CLIMA.....	5
3.2.3 VEGETAÇÃO .....	5
4. CONTEXTO GEOLÓGICO .....	6
4.1 CONTEXTO REGIONAL .....	6
4.1.1 A OROGENIA ANTLER.....	6
4.1.2 A OROGENIA SONOMA .....	9
4.2 O OURO TIPO CARLIN .....	10
4.3 GEOLOGIA DAS ÁREAS A E B .....	11
4.3.1 MAGMATISMOS E ALTERAÇÕES HIDROTERMAIS .....	13
5. MATERIAIS E MÉTODOS .....	16
5.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....	16
5.2 A BASE DE DADOS .....	16
5.2.1 CONFECÇÃO DOS DADOS .....	16
5.2.2 ANÁLISE GEOQUÍMICA.....	16
5.2.3 PREPARAÇÃO DOS DADOS PARA USO.....	17
5.4 TEORIA ESTATÍSTICA .....	19
5.4.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA COMPOSICIONAL.....	19
5.4.2 A TRANSFORMAÇÃO DE RAZÃO LOGARÍTIMICA CENTRALIZADA (clr).....	20
5.4.3 A TRANSFORMAÇÃO DE RAZÃO LOGARÍTIMICA ISOMÉTRICA (ilr).....	20
5.4.4 ESTATÍSTICAS COMPOSICIONAIS .....	20
5.4.5 A ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS COMPOSICIONAL.....	21
5.4.6 DIAGRAMAS TERNÁRIOS.....	23
5.3 ETAPA ESTATÍSTICA NO R® .....	23

7.	RESULTADOS .....	25
7.1	ESTATÍSTICAS CLÁSSICAS .....	25
7.1.2	BOXPLOTS .....	27
7.1.3	TESTE DE WILCOXON (MANN-WHITNEY).....	30
7.2	ESTATÍSTICAS COMPOSICIONAIS.....	32
7.3	ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS .....	33
7.4	A ESCOLHA DOS FAREJADORES .....	34
7.5	DIAGRAMA TERNÁRIO .....	34
7.6	RESULTADOS DA UTILIZAÇÃO DO BALANCE .....	36
7.6.1	DISPERSOGRAMA.....	36
7.6.2	BUBBLEPLOTS .....	37
8.	DISCUSSÕES .....	39
8.1	NATUREZA DOS DADOS .....	39
8.2	O FATOR GEOLÓGICO.....	39
9.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	41
9.1	PRÓXIMOS PASSOS .....	41
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	43

## 1. INTRODUÇÃO

Elementos farejadores, de acordo com o Instituto Norte-americano de Geociências, são elementos relativamente móveis, que ocorrem em forte associação com um elemento ou minério, mas podem ser mais facilmente detectados por métodos analíticos, pois formam auréolas mais abrangentes ao redor de um corpo de interesse. Seu uso em conjunto com a geoquímica tem sido uma das linhas de frente na exploração mineral, ao lado da geologia e geofísica, em programas de exploração e avaliação de recursos ao redor do mundo.

McQueen & Munro (2003) destacam que o estabelecimento de elementos farejadores pode ajudar na identificação de associações entre elementos e rochas hospedeiras, reduzindo ruídos geoquímicos e aperfeiçoando técnicas exploratórias.

O uso com sucesso de métodos convencionais em análise geoquímica exploratória em áreas de cobertura rasa ou descobertas, levou a uma redução de investimentos em inovação. A confiança em metodologias passadas agora tornam mais lentos os movimentos em direção a novas tecnologias e abordagens em direção a ambientes mais profundos e incomuns. (Winterburn *et al.*, 2017)

As suposições fundamentais da estatística clássica, no entanto, são muito rígidas e necessitam de certos dados serem cuidadosamente coletados, pois os dados geoquímicos exercem influências sobre os valores absolutos e a variabilidade de um elemento medido (Kürzl, 1988). Tais efeitos podem ser causados pela própria amostragem e procedimentos analíticos, mudanças de litologia ou mineralizações. De tal forma, Kürzl (1988) sugere que estatística clássica não é adequada para tais situações, levando a interpretações duvidosas. Sendo novas abordagens, em análises exploratórias, necessárias para tratar este tipo de dado.

Dados composicionais consistem de vetores cujas componentes são proporções ou porcentagens de algum total. Sua peculiaridade é que sua soma está restrita a uma constante, 1

para proporções, 100 para porcentagens ou possivelmente outra constante  $c$ , como por exemplo em partes por milhão (ppm) em composições de traços de elementos.

Um olhar superficial para estes dados dá a impressão de serem vetores com números reais, consequentemente, nas últimas décadas todos os métodos estatísticos concebidos para dados sem restrições foram empregados em dados composicionais. Isto ocorre apesar dos profissionais estarem conscientes, ou deverem estar conscientes, de que o espaço amostral para vetores composicionais é radicalmente diferente do espaço euclidiano real associado a dados sem restrições. Várias advertências foram feitas, algumas tão antigas como em 1897 por Karl Pearson sobre correlações espúrias em dados composicionais e muito tempo depois em 1960 pelo geólogo Felix Chayes. (Pawlowsky-Glahn *et al.* 2015)

Inicialmente as tentativas para superar os problemas se limitaram a ver o que estava dando errado quando se aplicavam diretamente as técnicas de análise multivariada a dados composicionais. Mas foi somente a partir dos trabalhos de John Aitchison que uma nova teoria matemática foi desenvolvida (Aitchison, 1982) para tratar adequadamente os problemas relacionados a dados composicionais.

## 2. OBJETIVO

O objetivo do trabalho é testar um modelo para selecionar as melhores variáveis a serem adotadas em uma fórmula de farejadores, o qual já foi testado por Braga *et al.* (2016) em amostras na região de Amapari/AP e é baseado na teoria de análise composicional de Pawlowsky-Glahn & Olea (2004).

O trabalho, no entanto, não abrange toda a metodologia testada por Braga *et al.* (2016), apenas a etapa de treinamento do método, a qual envolve encontrar, através da análise composicional, os melhores elementos para compor a fórmula do *balance* de farejadores.

O teste foi aplicado em um conjunto de dados geoquímicos da região de Nevada, nos Estados Unidos, onde duas áreas A (considerada não-mineralizada) e B (considerada mineralizada) foram definidas para o trabalho. Identificando assim quais seriam os elementos mais adequados para compor o *balance*.



### 3. LOCALIZAÇÃO, ACESSOS E ASPECTOS FISIOGRAFICOS

#### 3.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSOS

As áreas A e B definidas para o método (mais detalhes sobre a seleção das áreas em 5.2.3) encontram-se na porção norte do estado de Nevada, nos Estados Unidos passando por três condados. Área B possui 1274 km<sup>2</sup>, passa pelos condados de Elko e Eureka, enquanto a área A com 1674 km<sup>2</sup>, passa por Eureka e Lander (Figura 1). As duas áreas estão definidas entre as cidades de Battle Mountain, a oeste, Carlin a leste e são cortadas pela rodovia interestadual I-80, que cruza o continente ligando a costa leste a costa oeste americana.

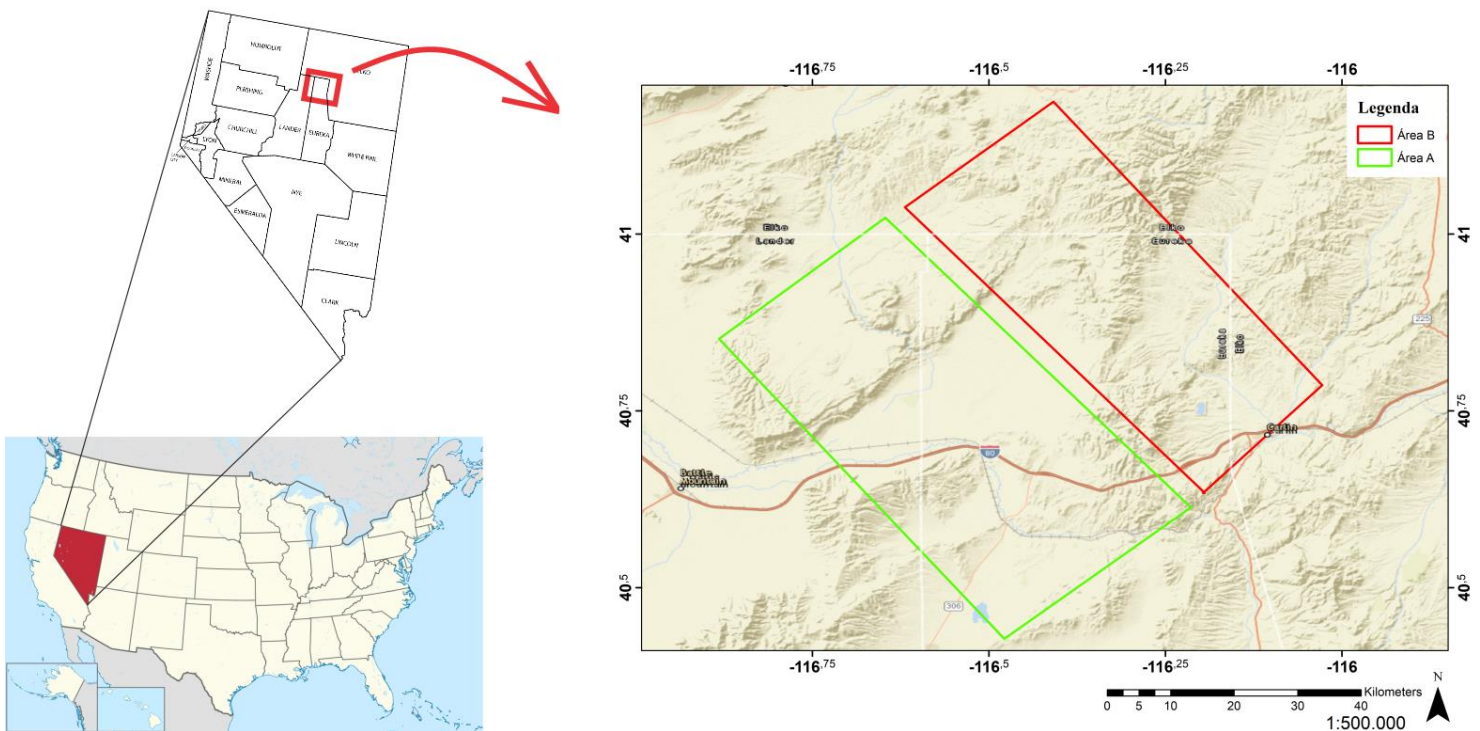


Figura 1– Mapa de localização da área de estudo no estado de Nevada, EUA.

A área A pode ser acessada também pela rodovia estadual 306, que liga a cidade de Austin a rodovia I-80, além de estradas como a Rock Creek road e a Boulder Flats road, que a liga a área B, que pode ser acessada pela rodovia estadual 278, que liga a cidade de Eureka a cidade de Carlin e pela Newmont Barrick road, ao norte.

## **3.2 ASPECTOS FISIOGRAFICOS**

### **3.2.1 RELEVO**

Na porção central/norte do estado, onde estão presentes as áreas A e B, o relevo predominante é de planícies de sal, pradarias e principalmente a topografia de *basin and ranges*, que está inserida no contexto geológico de estiramento crustal ocorrido durante o Mioceno, na região onde hoje se encontra a *Great Basin*, onde ocorrem diversas cordilheiras com orientação norte-sul, separadas por vales de mesma orientação. Sua formação é atribuída a *grabens* e *horsts* formados durante esforços distensivos. Alguns autores acreditam que esta feição é causada também pelo basculamento de blocos pela presença de falhas normais em pelo menos um de seus lados (Price, 2003).

### **3.2.2 CLIMA**

O clima no estado é um dos mais secos no país, devido a presença de um dos quatro desertos norte-americanos (*Great Basin Desert*), além de regiões semiáridas. No entanto, a porção norte do estado abriga florestas mais frias e picos nevados. Suas temperaturas podem facilmente ultrapassar os 40°C durante o dia e cair abaixo de 0°C a noite. O estado é muito afetado por secas em rios importantes como o Colorado, incêndios em larga escala em sua vegetação nativa devido as altas temperaturas e inundações durante estações chuvosas. (Runkle *et al.* 2017)

### **3.2.3 VEGETAÇÃO**

A vegetação na porção norte do estado é muito marcada pelo contraste entre vegetações rasteiras e florestas altas. Entre as espécies de árvores encontradas, destacam-se o zimbro pinyon, pinheiros, bordos e mógnos. Entre os arbustos, o mais característico da região é a artemísia, além de vegetação rasteira comum em climas áridos. (Thorin, 2002)

## **4. CONTEXTO GEOLÓGICO**

### **4.1 CONTEXTO REGIONAL**

A história geológica da região passa por diversos estágios de evolução, desde a formação do embasamento Arqueano-Proterozoico, deposição de rochas clásticas, formação de sequências sedimentares plataformais, os eventos orogênicos Antler e Sonoma, além de sucessivos magmatismos ao longo do Mesozoico e Cenozoico.

A região norte de Nevada tem sua formação associada ao Paleoproterozoico, quando terrenos foram acrecionados ao cráton Arqueano de Wyoming, durante a formação do supercontinente Laurentia (Cline *et al.*, 2005). A zona de sutura é definida pelo cinturão de Cheyenne, tornando a região uma mistura de rochas arqueanas e paleoproterozóicas.

Durante o Meso- e Neoproterozoico, sucessivos rifteamento relacionados a quebra de Laurentia, causaram um afinamento da crosta à oeste. Os esforços extensionais contribuíram para a deposição de rochas clásticas, levando a um espessamento da crosta durante o cambriano (Cline *et al.*, 2005). Em um contexto de margem continental, ocorreram deposições de sequências plataformais de carbonatos e folhelhos, à leste na plataforma, além de depósitos profundos de cherts e argilitos à oeste, desde o Cambriano tardio ao Devoniano. Mais tarde, tais rochas se tornaram hospedeiras das mineralizações de ouro tipo Carlin, após serem empurradas em direção ao continente pelo empurrão Roberts Mountains, principal evento da orogenia Antler.

#### **4.1.1 A OROGENIA ANTLER**

A orogenia Antler foi definida por P. B King (em Nilsen & Stewart, 1980) como um cinturão de rochas, formado no início do Mississípico, que se estendem desde o deserto de Mojave na Califórnia até o estado de Idaho, passando pela região central de Nevada. Está limitado a leste por rochas cratônicas e a oeste pelo alóctone de Golconda, formado posteriormente pela orogenia Sonoma. É composta por rochas de assoalho oceânico,

depositadas desde o final do Cambriano até o Devoniano, que foram deformadas e empurradas sobre depósitos de plataforma rasa pelo empurrão Roberts Mountains.

As rochas depositadas abaixo do empurrão são conhecidas como rochas da placa inferior, englobando unidades como as formações Shwin (Cambriano), Hanson Creek (Ordoviciano-Siluriano), Roberts Mountains (Siluriano-Devoniano), o calcário Bootstrap (Siluriano-Devoniano), a formação Popovich (Devoniano) e a unidade Rodeo Creek, também devoniana. (Prihar *et al.*, 1996)

Já as rochas da placa superior, caracterizadas como o alóctone Roberts Mountains abrigam a formação Valmy (Ordoviciano) e o chert Devoniano Slaven (Prihar *et al.* 1996), além das formações Vinini (Ordoviciano) e Elder (Siluriano-Devoniano). (Emsbo *et al.*, 2003)

Existem diversas hipóteses para o modelo evolutivo da orogenia, porém não há consenso entre os autores para muitos destes modelos. Dickinson (1983) analisa características estruturais e estratigráficas das sequências clásticas pós-orogênicas, que favorecem interpretações da orogenia por modelos colisionais e propõe um modelo que se assemelha a uma colisão arco-continente entre a margem passiva paleozoica norte americana e um arco magmático em direção a leste, onde o limite do continente subductou em direção a oeste, sob o prisma acrecionário representado pelo alóctone Roberts Mountains.

O autor inclui em sua hipótese um espalhamento de retro arco em águas profundas, que seria anterior a orogenia e que posteriormente evoluiu para um sistema de espalhamento oceânico convencional, levando a formação de uma bacia oceânica a oeste do orógeno, a qual abrigaria sedimentos líticos erodidos de uma sequência pós-Antler e fariam parte da sequência Havallah, unidade que representa o alóctone de Golconda, formado durante a orogenia Sonoma, de idade terciária.

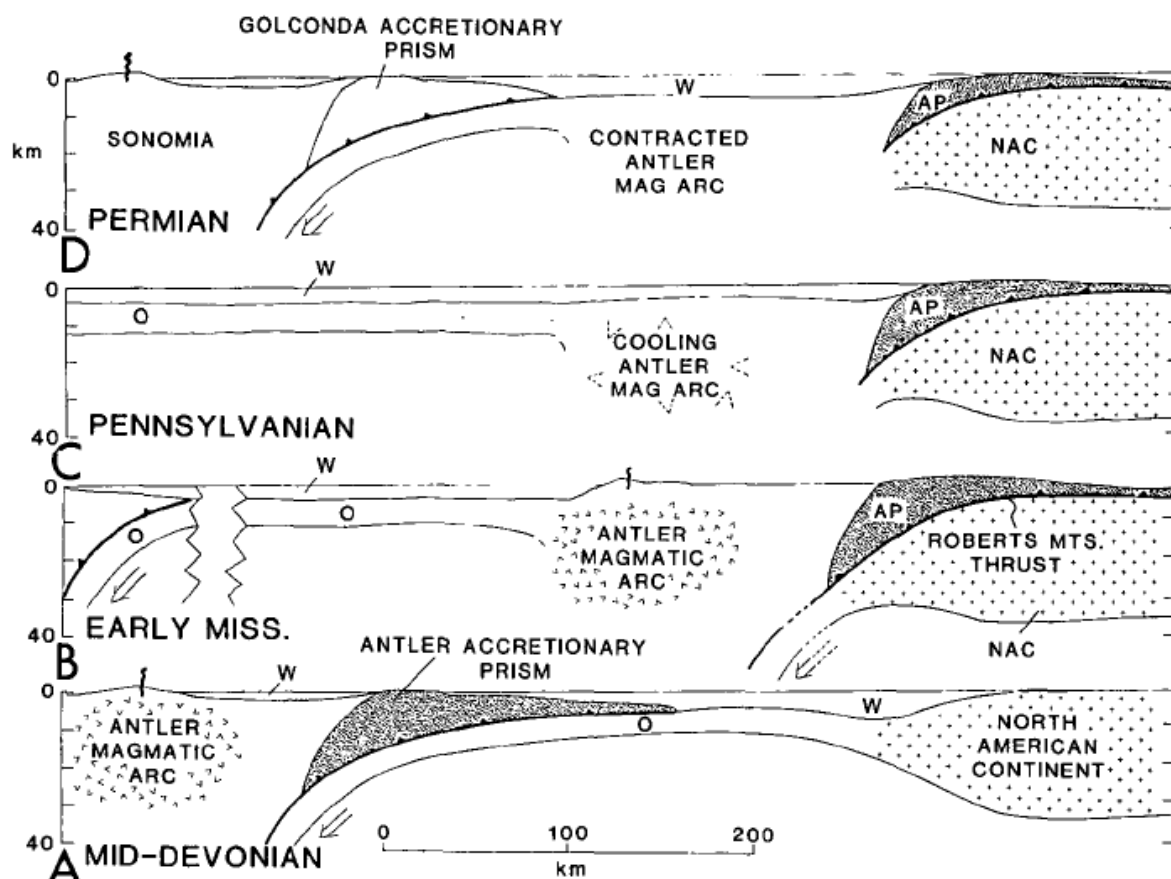


Figura 2 - Linha temporal dos eventos que iniciaram a orogenia Antler (A e B) e os eventos subsequentes, pré orogenia Golconda. Retirado de Speed & Sleep, (1982)

No entanto, Burchfiel & Davis (1975) apontam a dificuldade em explicar o motivo de não haver rochas de seqüências ofiolíticas da crosta oceânica junto com os depósitos sedimentares profundos deslocados. Apesar de haver evidências de fatias de rochas peridotíticas serpentinizadas e vulcânicas máficas deformadas, não estão em quantidade para justificar seu deslocamento em conjunto com o alóctone. O autor então sugere que na ocasião do empurrão, ocorre uma subducção do embasamento oceânico em direção a leste, por baixo da margem continental norte americana. Apesar de não haver forte evidência da ocorrência, no cinturão de Antler, de rochas vulcânicas basálticas, andesíticas e silicosas, de idades mississípicas (pós-Antler), apoia tal modelo.

#### 4.1.2 A OROGENIA SONOMA

O que prosseguiu a orogenia Antler foi uma nova fase de sedimentação e a formação de uma nova plataforma continental no alóctone Roberts Mountains. O cinturão Antler sofreu com sucessivos soerguimentos e erosões, fornecendo sedimentos para as bacias rasas e profundas adjacentes, enquanto o surgimento de um novo arco magmático a leste torna o espaço entre este e o cinturão numa bacia profunda muito semelhante a bacia pré-Antler. (Burchfiel & Davis, 1975)

Os sedimentos da sequência Havallah se depositaram na bacia, entre eles cherts, argilitos, clastos de rochas continentais e vulcanismos máficos. E novamente, durante o Permiano tardio e início do Triássico, um processo de convergência resultando numa colisão arco-continente gerou um deslocamento dos depósitos profundos em direção a leste, sobre as rochas da margem continental, no que ficou conhecido como o empurrão Golconda, durante a orogenia Sonoma.

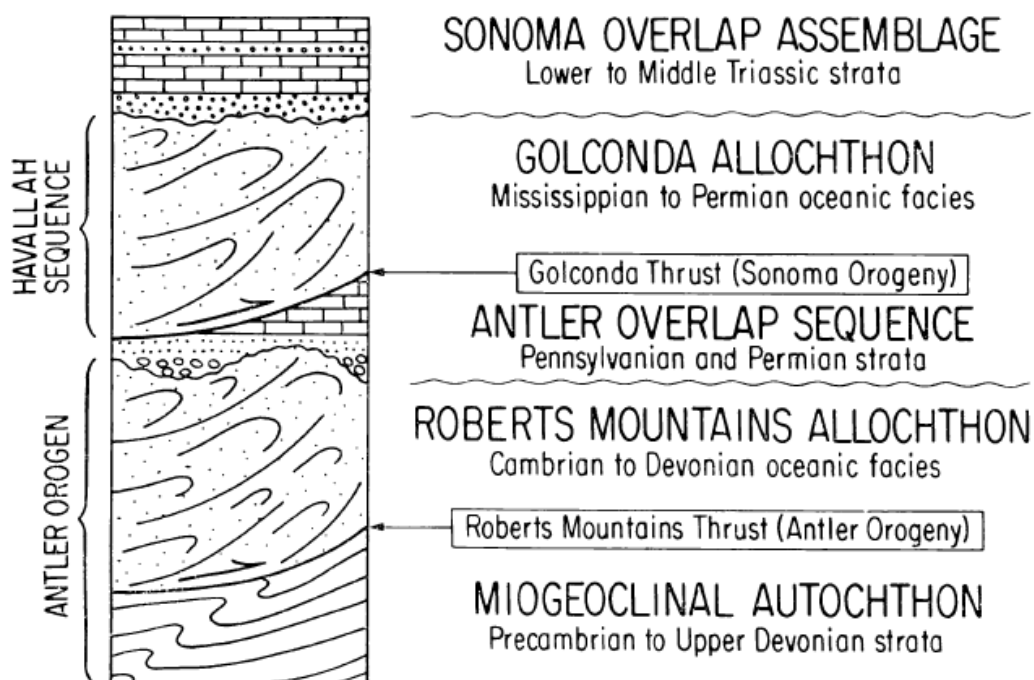


Figura 3 - Figura mostrando a posição da sequência Havallah sobre as rochas erodidas da orogenia Antler, na porção central de Nevada. Retirado de Dickinson et al. (1983)

A orogenia, cujo alóctone se posicionou a leste do alóctone Roberts Mountains, como descrito por Burchfiel & Davis (1975), tem impressionante semelhança com os eventos de

Antler. Golconda cobre o que é atualmente a porção leste do estado de Nevada. Sonoma, no entanto, não é um último evento orogenético, os quais voltaram a ocorrer durante o Cretáceo e início do Cenozoico, além de intensa atividade ígnea, vulcânica e plutônica, essencial para a formação dos depósitos de ouro.

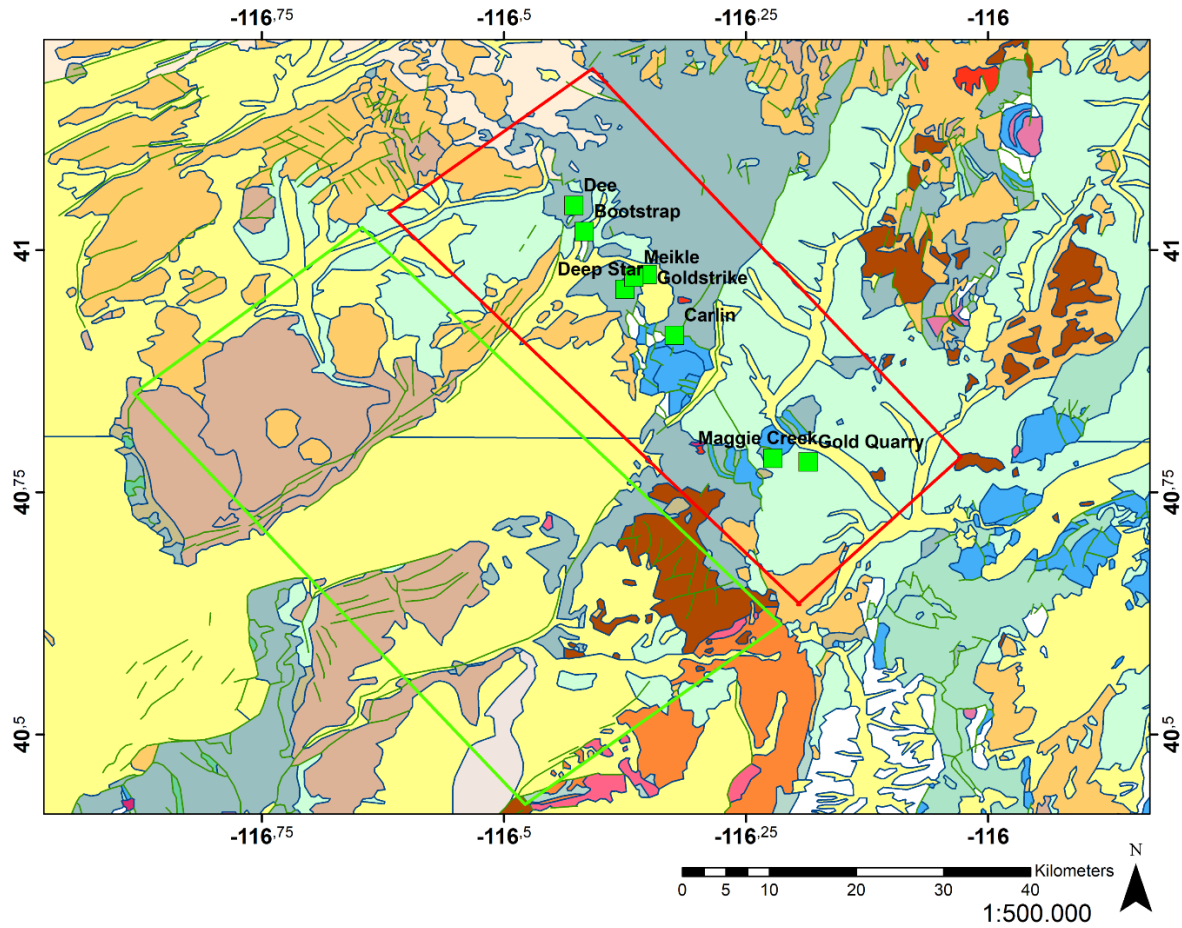
## **4.2 O OURO TIPO CARLIN**

Os depósitos de ouro tipo Carlin (CTGD's) reconhecidos na década de 60, no estado de Nevada, mais especificamente na região da cidade de Carlin. Tratam-se de depósitos epigenéticos, de piritas auríferas disseminadas, hospedados em rochas sedimentares. Também são caracterizados pela alta tonelagem e teores mais baixos. (Cline *et al.* 2005)

As partículas de ouro tem tamanho micrométrico a submicrométrico, característica que o levou a ser conhecido como “ouro invisível” pela comunidade mineradora da região, devido a sua dificuldade de identificação em *placers*. Os depósitos tem forte controle estrutural e estratigráfico, além de ter sua formação associada a fluidos meteóricos, magmáticos e metamórficos.

CTDG's ficaram conhecidos mundialmente conhecidos pela dimensão dos depósitos, alguns ultrapassando 1000 t de Au. Patterson & Muntean, (2011) apontam que a produção de ouro tipo Carlin correspondia a 60% da produção de ouro anual norte americana até aquele ano, assim como a 6,5% da produção mundial. Isto levou pesquisadores a buscar e identificar depósitos de mesma gênese em outras partes do globo, em países como a China (Li & Peters, 1998).

4.3 GEOLOGIA DAS ÁREAS A E B



Mapa geológico da região central-norte do estado de Nevada

Legenda

Cenozoico

- Qa-Qp** Depósitos aluviais e de playa (Quaternário)  
Inclui depósitos de praias e dunas arenosas, em algumas localidades
- QTs** Rochas sedimentares lagunares e marinhas (Plioceno ao Quaternário)
- Tba** Derrames basálticos e andesíticos (Início do Mioceno a início do Plioceno)  
Maioria das rochas tem idade entre 17 e 6 Ma. Pode incluir rochas mais jovens do que 6 Ma em algumas localidades.
- Tr3** Derrames riolíticos e rochas intrusivas rasas (Mioceno médio a tardio)
- Tts** Tufos de cinzas e rochas sedimentares tufáceas (Mioceno médio a tardio)
- Ts3** Rochas sedimentares tufáceas (Eoceno tardio ao Mioceno tardio)
- Tmi** Rochas intrusivas de composição intermediária a máfica (Eoceno ao Mioceno)
- Tba2** Andesitos e rochas de composição intermediária (Eoceno médio a tardio)  
Derrames e brechas
- Tgr** Rochas graníticas (Paleoceno ao Mioceno tardio)  
Majoritariamente quartzo monzonito e granodiorito

Mesozoico

- Jv** Arenitos vulcânicos, tufos de fluxos de cinzas félsicos, derrames de riolitos e rioladitos (Jurássico médio ao Cretáceo inferior)  
Grupo Pony Trail das montanhas Cortez, Eureka County
- Jgr** Rochas graníticas (Jurássico)  
Majoritariamente quartzo monzonito e granodiorito

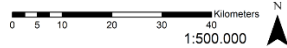
Paleozoico

- PPcd** Calcários arenosos e siltosos, conglomerados e siltitos (Pennsylvânico ao Permiano tardio)  
Inclui formações como Strathearn, Buckskin, Beacon Flat e Carlin Canyon.
- MDs** Folhelhos, siltitos, arenitos, conglomerados com clastos de cherts e calcários (Devoniano ao Mississípico)
- St** Calcários e siltitos cálcicos, depósitos basais de chert (Siluriano ao início do Devoniano)
- Oc** Calcário, dolomitos, folhelhos e quartzitos (Ordoviciano)  
Inclui unidades como o grupo Pogonip, o quartzito Eureka e o diorito Ely Springs.
- Osv** Rochas vulcânicas e silicosas (Ordoviciano ao Devoniano)  
Cherts, folhelhos, quartzitos, greenstones e quantidades menores de calcário. Abriga a formação Valmy na porção central-norte do estado de Nevada.

Simbologia

- Área B selecionada para o método
- Área A selecionada para o método
- Falhas normais
- Contatos litológicos

Escala e orientação



Fonte

Stewart, J.H., and Carlson, J.E., 1978, Geologic Map of Nevada: U.S. Geological Survey and Nevada Bureau of Mines and Geology, 1:500,000 (not part of any formal series, printed and distributed by the U.S. Geological Survey, G75163, reprinted, 1981, G81386).

Figura 4 - Mapa geológico e legenda da região do estado onde estão localizadas as áreas A e B. Modificado de Stewart & Carlson (1978)



A área B selecionada para o trabalho como “mineralizada” abriga o mais importante *trend* de CTGD’s atualmente, que inclui as minas de Meikle, Carlin, Dee, Ren, Capstone, Betze-Post, Magie Creek e Gold Quarry, entre outras.

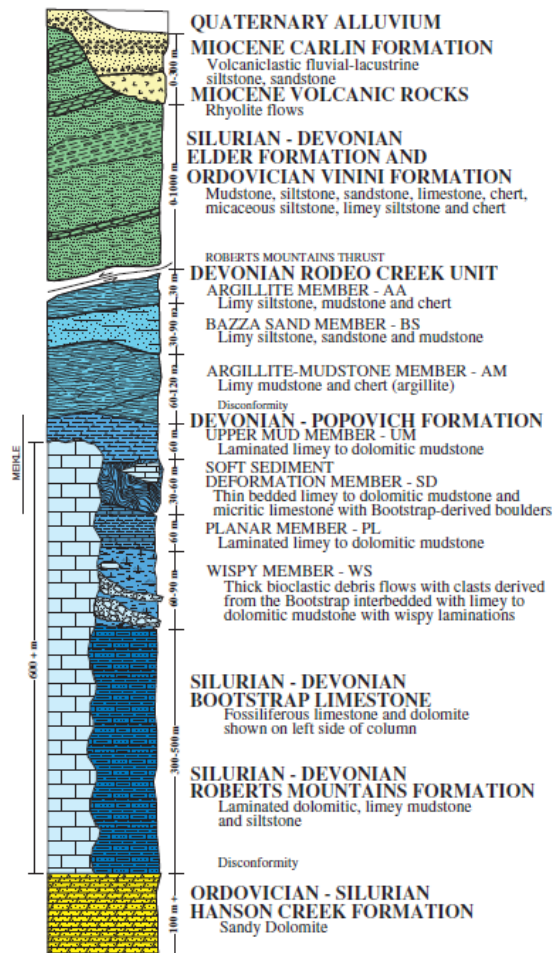


Figura 5 – Coluna estratigráfica do *trend* norte de Carlin, localizado na área B selecionada. Retirado de Emsbo et al. (2003).

Os minérios de ouro tipo Carlin estão hospedados principalmente nas formações para autóctones de Roberts Mountains e Popovich, assim como na unidade calcárea Bootstrap. Tal unidade é composta por *wackestones* biomicríticas a *grainstones*, contendo oóides depositados em plataforma continental rasa. Já a formação Roberts Mountains é um calcáreo siltoso laminado, que representa um sistema deposicional de águas mais profundas e baixo ângulo de talude. (Emsbo *et al.* 2003)

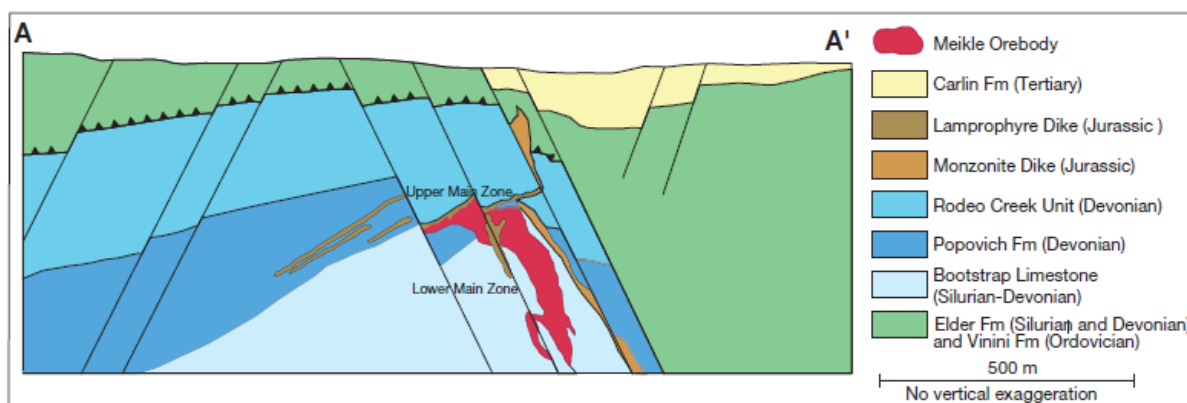


Figura 6 – Seção geológica simplificada da região da mina de Meikle, localizada no *trend* norte de ouro tipo Carlin. Retirado de Emsbo et al. (2003)

A formação Popovich é dividida em quatro membros descritos por Bettles (2002). A unidade inferior é o membro Wispy, uma intercalação entre espessos fluxos de detritos bioclásticos com *mudstones* calcáreos finamente laminados. O membro Planar, sobreposto a Wispy, consiste de finos fluxos detríticos fossilíferos intercalados à *mudstones* calcáreos laminados. Sobreposto, encontra-se o membro Soft-Sediment Deformation, que consiste de *mudstones* micríticos acinzentados a negros, de acamamento médio a laminar. O membro mais superior Mud, é composto por *mudstones* cálcicos cinza escuros, com finas camadas de pirita e lentes de chert fosfatado. Acima da formação Popovich encontra-se a unidade Rodeo Creek, composta por argilitos intercalados com siltosos *mudstones* carbonáticos e *cherts*. (Emsbo et al. 2003)

As rochas para-auóctones são sobrepostas por uma sequência do alóctone Roberts Mountains, composta de *cherts*, *siltstones*, *mudstones* e calcáreos, representando porções das formações Vinini e Elder, além do *chert* Slaven.

#### 4.3.1 MAGMATISMOS E ALTERAÇÕES HIDROTERMAIS

As rochas intrusivas mais antigas na área são do Jurássico tardio, representadas por uma suíte cálcio-alkalina, conhecida como Goldstrike. São intrusões dioríticas, riodacitos altamente alterados e diques de lamprófiro, segundo Bettles (2002)

A intrusão aflora na região da mina Betze-Post e se estende 4km para sudoeste e sudeste em uma estrutura tipo sill maciça, a qual se torna mais espessa conforme mergulha para sudoeste, chegando a uma espessura de 600m. A intrusão produziu uma zona de alteração termal em formato de auréola que se estende a partir da intrusão, composta por hornfels diopsídicos após rochas carbonáticas e hornfels quartzosos após rochas siliciclásticas, além de mármore, que se estende ainda mais adiante para fora (Bettles, 2002). Também há presença de exoskarn metassomático nos carbonatos e endoskarns nas intrusões.

Os diques de riódacito foram inicialmente descritos como monzonitos, se distribuem pelas diversas falhas da região e são altamente alterados para sericita em quartzo. Os lamprófiros ocorrem como dique em falhas de alto ângulo de direção N-NW ou como sills acamadados e possuem fenocristais de hornblenda ou flogopita. (Emsbo, 1999)

Além de intrusões jurássicas, também ocorrem pela área diques porfiríticos de dacitos a riolitos cálcio-alcalinos, datados de 40 a 37 Ma, durante o Eoceno tardio, que se encontram em menor quantidade do que as intrusões jurássicas. (Bettles, 2002)

As rochas intrusivas na região foram todas localmente alteradas, em um sistema hidrotermal Jurássico anterior às mineralizações tipo Carlin. Diques de lamprófiro foram alterados em calcita, dolomita, magnesita, clorita, quartzo e ilita. Enquanto os riódacitos foram alterados em quartzo, ilita e pirita. Além dos diques eocênicos cálcio-alcalinos, alterados para ilita, quartzo, esmectita e caolinita, sem observar alteração nas biotitas.

Emsbo *et al.* (2003), no entanto, ressalta que não foram encontradas evidências dos minerais primários e de alterações prévias nas amostras posteriormente alteradas pelas mineralizações tipo Carlin, com a excessão de quartzo, pirita e alguma ilita. O autor, utilizando um diagrama logarítmico isocônico desenvolvido por Grant (1986), avaliou as mudanças nas composições durante as alterações hidrotermais, constatando que Al, Ti, P, Si e Fe foram imóveis. Também não observou a entrada de Cd, Zn e Pb.

Outros metais de transição, como Co, Ni, V, U, Cr, Mo, bem como alguns elementos de alta força iônica (Sc, Y, Th, Zr, Hf, Ti, Nb e Ta) também são imóveis. Emsbo *et al.* (2003) também observou que os diques mineralizados em diferentes lugares possuem consistentes aumentos em Au, As, Sb, W, S, Hg, Te, Tl e Ag, assim como perdas em Mn, Na, Ca, Mg, Sr. A ausência de cálcio, neste caso, pode ser explicada pelos processos de argilização e decarbonitização sofridos durante a mineralização.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Diversos *softwares* foram usados nas etapas do trabalho, tais como: ArcMap 10.6 (ESRI's ArcGIS®), R® 3.5.1 (R Core Team, 2014), os pacotes “*compositions*” (Van Den Boogaart & Tolosana-Delgado, 2006), “*robCompositions*” (Templ *et al.* (2011) e “*sp*” (Pebesma & Bivand, 2005) para o R®, Corel Draw® X8 e o pacote Microsoft Office®.

### 5.2 A BASE DE DADOS

#### 5.2.1 CONFECCÃO DOS DADOS

O trabalho utilizou uma base de dados aberta, contida no relatório aberto 02-227 confeccionado por Coombs *et al.* (2002), disponível na página do serviço geológico norte americano (*United States Geological Survey*, USGS).

Tratam-se de análises geoquímicas de amostras de solos e sedimentos de correntes coletadas de forma sistemática como parte do programa de reconhecimento hidrogeoquímico de sedimentos de corrente (*Hydrogeochemical and Stream Sediment Reconnaissance*, HSSR), que por sua vez, faz parte do programa nacional de avaliação de urânio (*National Uranium Resouce Evaluation*, NURE), criado na década de 70.

Os laboratórios envolvidos na análise das amostras para o estado de Nevada foram o Lawrence Livermore National Laboratory (LLL) e o Savannah Rvier Laboratory (SRL). A responsabilidade de analisar as amostras da área foi do LLL até a sua saída em 1979, momento em que o SRL assumiu as análises para certos estados, entre eles, Nevada. (Smith, 2000)

#### 5.2.2 ANÁLISE GEOQUÍMICA

A análise geoquímica das amostras foi realizada nos laboratórios do próprio serviço geológico americano, envolvendo três métodos: ICP-40, ICP-Partial e AA (absorção atômica) (Coombs *et al.* 2002). O método ICP-40, também conhecido como ICP-AES (*Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry*) envolve a dissolução da amostra em uma série

de ácidos, incluindo ácido fluorídrico, analisando 40 elementos simultaneamente. O ICP-Partial envolve uma digestão em ácidos mais fracos, seguido de extração orgânica e detecta apenas 10 a 15 elementos traço simultaneamente. O elemento ouro (Au) é o único analisado por absorção atômica, que consiste na absorção da luz por átomos do elemento no estado gasoso. (Coombs *et al.* 2002)

### 5.2.3 PREPARAÇÃO DOS DADOS PARA USO

O primeiro passo foi carregar o conjunto de dados no software ArcMap® para separar os dois conjuntos de amostras “Área A” e “Área B”, criando dois *shapes* poligonais que destacassem as duas áreas de interesse, utilizando a ferramenta Clip para separá-las e por fim, exportando os dados destacados destas áreas para outro editor (Excel®). Cada área, separadamente, possui dados geoquímicos de 75 amostras, totalizando 150 amostras entre as áreas A e B.

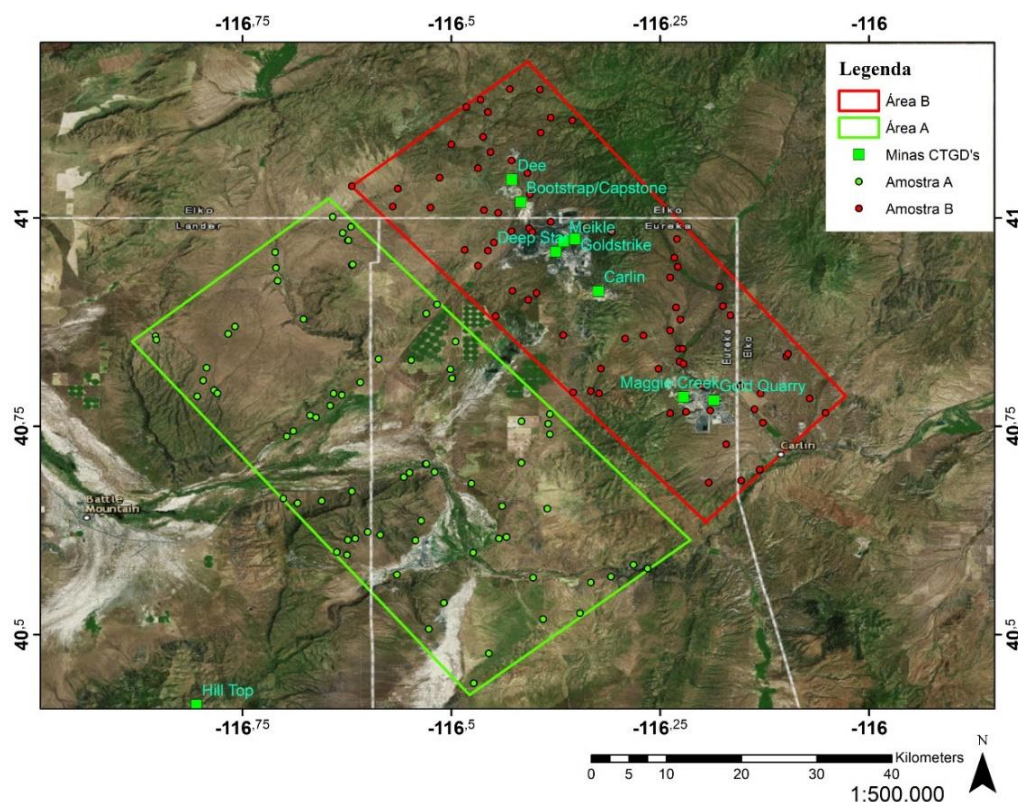


Figura 7 – Imagem de satélite (retirada da base de mapas online do ArcMap, créditos: DigitalGlobe) com as áreas A e B delimitadas, mostrando a posição das minas de ouro tipo Carlin presentes na região.

As áreas não foram selecionadas ao acaso. A área **B** foi escolhida por abrigar diversas minas importantes de ouro tipo Carlin, que servem como controle e comprovam a presença de mineralizações, como mostra a figura abaixo.

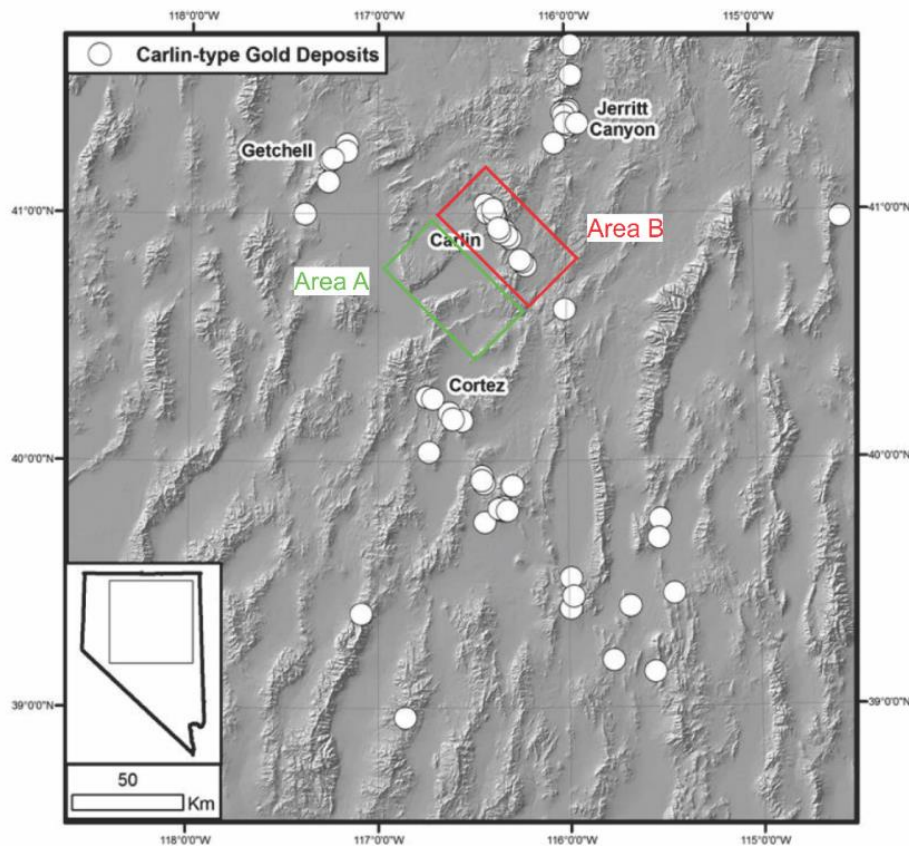


Figura 8 - Região do estado de Nevada com diversos trends de minas de ouro tipo Carlin representadas, incluindo o *trend* Carlin norte escolhido com a área "mineralizada" para o trabalho. Modificado de Patterson & Muntean (2011)

A área A adjacente, foi assim definida por possuir o mesmo contexto geológico, porém sem a presença de mineralizações de ouro tipo Carlin. Apesar de o estado de Nevada abrigar milhares de minas de diversos commodities, espalhados por toda a região, quase não há atividade mineradora na área, considerada como “não mineralizada” para o método.

O segundo passo foi preparar os dados no Excel<sup>®</sup> para o seu uso no R<sup>®</sup>, criando dois arquivos diferentes, com a mesma base de dados, porém propósitos diferentes. No primeiro, denominado “Clássico”, com o propósito de ser usado para a estatística clássica (sumário, *boxplots* e teste de Wilcoxon) e para o PCA composicional, os valores “ND” (não determinado)



e “B” (Nenhum valor analítico foi observado), presentes em alguns elementos de algumas amostras, foram substituídos pela mediana das amostras restantes para aquele elemento. A substituição foi feita pois sem ela o R não consegue produzir o resultado, pois não processa, para os testes estatísticos, amostras com entradas numéricas e de texto.

Já no segundo arquivo, denominado “Composicional”, as amostras que possuíam “ND” e “B” tiveram tais valores substituídos por “MAR” (Missing At Random), uma das exigências do pacote “compositions” (Van Den Boogaart & Tolosana-Delgado, 2006) para o seu funcionamento, no R<sup>®</sup>. Os valores de todos os elementos que estavam abaixo limite de detecção foram multiplicados por -1 para que se tornassem negativos, outra exigência do pacote.

## 5.4 TEORIA ESTATÍSTICA

### 5.4.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA COMPOSICIONAL

A análise descritiva de dados composicionais é estruturada em três etapas: 1) a média composicional e a matriz de variação são calculadas; 2) Estudo preliminar para identificar relações entre duas ou mais variáveis através de diagramas ternários; 3) Exploração da estrutura codependente, usando análise de componentes principais.

Dados composicionais contém apenas informações sobre magnitudes relativas, que evitam correlações falsas. As dependências entre variáveis de uma composição podem ser examinadas em espaço real, analisando a estrutura covariante de quocientes logarítmicos. As vantagens de usar esta abordagem não são apenas numéricas ou relacionadas a simples operações matemáticas, mas sim a inversão da matriz de covariância. A abordagem composicional, segundo Pawlowsky-Glahn & Olea (2004), consiste de uma projeção do espaço amostral original, o simplex ( $S^D$ ), em um novo espaço amostral, chamado de espaço real D-1. As partes individuais da composição ( $x_i$ ) são chamadas componentes e a soma dos valores de todos os componentes (**c**) é chamada **total**.



$$S^D = \left\{ X; x_i > 0, i = 1, 2, \dots, D; \sum x_i = c \right\}$$

O fechamento do conjunto de dados composicionais é dado por:

$$\mathbb{C}[x] = \frac{c \cdot x}{1^t \cdot x}$$

$c$  usually is 1

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_D]$$

$$1^t \cdot x = x_1 + x_2 + \dots + x_D$$

#### 5.4.2 A TRANSFORMAÇÃO DE RAZÃO LOGARÍTIMICA CENTRALIZADA (clr)

$$clr(x) = \left( \ln \frac{x_i}{g(x)} \right)_{i=1 \dots D}$$

Onde  $g$  é a média geométrica. A **clr** é uma transformação isométrica entre o espaço simplex ( $S^D$ ) e o dimensional real (D-1). (Pawlowsky-Glahn *et al.*, 2015)

#### 5.4.3 A TRANSFORMAÇÃO DE RAZÃO LOGARÍTIMICA ISOMÉTRICA (ilr)

A transformação **ilr** provê uma identificação entre o espaço euclidiano  $R^{D-1}$  e o espaço simplex  $S^D$  ao representar uma composição em função de uma base ortonormal de  $S^D$ . (Pawlowsky-Glahn *et al.*, 2015)

#### 5.4.4 ESTATÍSTICAS COMPOSICIONAIS

A média aritmética e a variância ou desvio padrão de partes individuais não servem como valores de tendência central e medidas de dispersão. O centro da amostra (**cen**), como descrito por Pawlowsky-Glahn *et al.* (2015), é a tendência central de uma amostra composicional de tamanho  $n$ . É definida como centro ou média composicional. Para uma base de dados de tamanho  $N$ , é definida como:

$$\text{cen} = \mathbb{C} \left[ \exp \left( \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \ln x_n \right) \right]$$

A matriz de variação descreve a dispersão em um conjunto de dados composicionais “T”, cuja matriz é  $\tau_{ij} = \text{var} \left( \ln \frac{x_i}{x_j} \right)$ . Quanto menor o elemento da matriz de variação, melhor a proporcionalidade entre os dois componentes. (Pawlowsky-Glahn *et al.*, 2015)

O *balance* é uma medida da importância relativa entre dois grupos de variáveis.

$$\xi_{M_1/M_2} = K \ln \frac{(\prod_{m \in M_1} x_m)^{\#M_2}}{(\prod_{m \in M_2} x_m)^{\#M_1}}; K^{-1} = \sqrt{\#M_1 \#M_2 (\#M_1 + \#M_2)}$$

Na fórmula acima, M1 representa o conjunto de elementos positivamente associados ao ouro, enquanto M2 representa o conjunto de elementos inversamente proporcionais ao ouro. Sua resposta numérica é chamada de *score*, a qual será usada posteriormente em conjunto com outros fatores para avaliar a eficácia do método. (Pawlowsky-Glahn *et al.*, 2015)

#### 5.4.5 A ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS COMPOSICIONAL

Composições são multivariadas por natureza. Diversas técnicas multivariadas, como a análise de componentes principais (*Principal component analysis*, PCA), análise de *clusters* ou análises discriminantes tem duas versões de abordagens composicionais. Existem diversas formas de obter uma decomposição de componentes com **PCA** para dados composicionais.

PCA é uma interpretação de uma decomposição em valores singulares (SVD) de uma matriz de dados. A decomposição SVD é:

$X_{np} = U_{np} D_{pp} V_{pp}^t$ , no caso de posto completo, isto é, quando todos os elementos da matriz diagonal D forem diferentes de zero.

X é a matriz com n linhas representando n amostras para p atributos ou variáveis

U é uma matriz com colunas ortonormais, denominadas scores

V é uma matriz com colunas ortonormais, denominadas carregamentos (loadings) ou componentes principais

D é uma matriz diagonal cujos elementos são os valores singulares ou autovalores ordenados decrescentemente

Na aplicação não se utilizam todos os elementos na decomposição, mas apenas algumas dimensões, usualmente 2 ou 3. A extensão desse método bastante conhecido na estatística multivariada clássica a dados composicionais é feita aplicando-se a transformação **clr** ao conjunto inicial de dados. Os carregamentos (loadings) que correspondem às colunas da matriz **V** são as componentes principais, as variáveis originais são representadas em termos dessas componentes. Usualmente não se representam todas as componentes.

Métodos baseados na transformação **clr** levam a uma única matriz de covariância. No entanto, os dados transformados não podem ser usados para uma técnica multivariada robusta como o PCA, desta forma, a **ilr** foi usada. (Pawlowsky-Glahn *et al.*, 2015)

No entanto as novas variáveis, transformadas pela **ilr**, não podem mais ser interpretadas diretamente, como as variáveis original. Sendo necessário um meio de reverter a transformação e interpretar os resultados de um **PCA** robusto na **ilr**. (Pawlowsky-Glahn *et al.*, 2015)

A abordagem composicional é aplicada com a função “pcaCoda” do pacote “robCompositions” de Templ *et al.* (2011), sendo muito eficiente em mostrar diferentes grupos de variáveis, além de destacar o papel e importância de algumas variáveis em relação as mineralizações de ouro. O principal resultado do **PCA**, para este trabalho, é o *biplot*, uma forma muito útil de interpretar a relação entre as variáveis envolvidas na análise. No entanto, para dados composicionais, não é possível interpretar os vetores de um *biplot* composicional, deixando como alternativa a análise das pontas destes vetores, que representam as razões logarítmicas entre duas partes envolvidas.

Existem três regras que devem ser consideradas ao usar um *biplot* para analisar a estrutura composicional de dependência:

- a. Se duas variáveis proporcionais possuem razões logarítmicas quasi-constantes, as pontas dos vetores estarão juntas.
- b. Se a situação for inversa, as variáveis possuirão vetores apontando em direções opostas.

- c. Em variáveis que possuem razões logarítmicas não relacionadas, os vetores serão apresentados ortogonais entre si.

#### 5.4.6 DIAGRAMAS TERNÁRIOS

Diagramas ternários mostram uma subcomposição de três vias, onde cada ponta representa a porção da respectiva variável. Van Den Boogart & Tolosana-Delgado (2013) demonstram que diagramas ternários representam os dados da forma como eles realmente são, composicionais ou não.

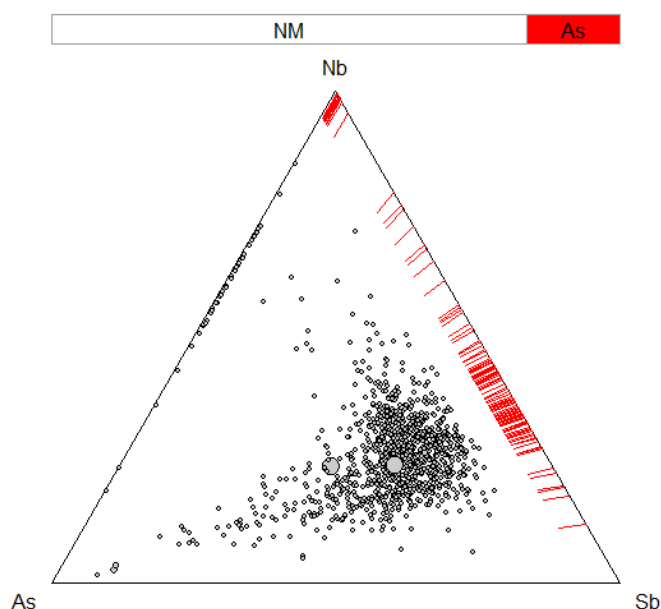


Figura 9 - Exemplo de diagrama ternário das composições para os elementos Nb, As e Sb, em outra base de dados, obtido com o pacote *compositions* no R. Os traços vermelhos indicam teores abaixo do limite de detecção para aquele elemento.

### 5.3 ETAPA ESTATÍSTICA NO R®

Para definir quais elementos seriam utilizados como farejadores, cinco ensaios estatísticos foram realizados (utilizando como ferramenta o *software* R® 3.5.1), dos quais três são estatísticas clássicas e os outros dois, composicionais. As três estatísticas clássicas utilizadas foram:

- Sumário dos dados geoquímicos de cada elemento para as amostras A e B, separadamente.
- *Boxplots* de cada elemento para as áreas A e B
- Teste de Wilcoxon

Seguidas de duas estatísticas composicionais:

- Matriz de variação
- Análise de componentes principais

Após os testes e a seleção dos elementos para compor o *balance* de farejadores, mais três ensaios com os dados composicionais foram realizados para averiguar se a escolha do *balance* foi adequada. São eles:

- Diagrama ternário das composições
- Dispersograma
- *Bubble plot*

Cabe ressaltar que as três estatísticas clássicas utilizam o pacote básico do programa, enquanto a análise de componentes principais utiliza o pacote “*robCompositions*” (Templ *et al.* (2011), a matriz de variação e diagrama ternário, o pacote “*compositions*” (Van Den Boogaart & Tolosana-Delgado, 2006) e o dispersograma e *bubble plot* os pacotes “*compositions*” e “*sp*” (Pebesma & Bivand, 2005).

## 7. RESULTADOS

### 7.1 ESTATÍSTICAS CLÁSSICAS

Nas tabelas de sumário a seguir, os elementos que possuíam análises geoquímicas por ambos os métodos (ICP-40 e ICP-Partial), foram representadas pelo método ICP-40, que se mostrou mais completo, detectando teores maiores para os elementos em questão. É o caso dos elementos: **Ag, As, Cd, Cu, Mo, Pb** e **Zn**. Contudo, os elementos **Bi** e **Sb** possuem apenas análises por ICP-Partial, as quais foram usadas como a única opção disponível.

O comando *summary* do pacote *sp* foi utilizado para a obtenção dos dados.

**Tabela 1:** Sumário (em ppm) para as análises geoquímicas da área A. O conjunto possui 75 amostras.

	Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
Ag	1	1	1	1	1	1
Al	51500	70050	72200	72109	75900	88500
As	3	6.5	11	10.08	13	20
Au	0.001	0.001	0.001	0.001707	0.002	0.013
Ba	383	941.5	1023	1036.4	1114.5	1733
Be	1	2	2	1.88	2	3
Bi	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Ca	100	18300	20900	23492	27450	53600
Cd	1	1	1	1.027	1	2
Ce	44	57.5	65	66.51	73.5	111
Co	4	8	9	10.48	11	36
Cr	60	86	104	113.8	123	351
Cu	9	18	21	21.8	23.5	60
Fe	18200	26450	30100	34113	37800	78100
Ga	13	17	18	17.85	19	23
K	8700	20400	23000	22293	24350	26900
La	26	35	38	39.6	43	68
Li	18	25	28	28.61	31	75
Mg	5400	7250	8600	10168	10950	37700
Mn	331	689.5	792	839.9	931.5	1752
Mo	1	2	3	3.147	4	13
Na	9800	16000	17300	17023	18600	21700
Nb	5	10	11	12	13	27
Ni	9	14.5	18	21.04	24	70
P	500	700	800	882.7	1050	1900
Pb	3	18	23	22.57	26.5	44

Sb	0.5	0.864	1.02	1.131	1.23	2.93
Sc	4	6	7	7.72	8	20
Sn	2	2	2	2.347	3	4
Sr	179	311.5	335	344.8	371	563
Th	2	9	10	10.27	11	19
Ti	2300	3450	4200	4633	5000	13400
V	48	74.5	84	98.28	117	235
Y	16	19	20	21.32	23.5	37
Zn	31	71.5	79	89.41	101.5	415

**Tabela 2:** Sumário (em ppm) para as análises geoquímicas da área B. O conjunto também possui 75 amostras.

	Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
Ag	1	1	1	1	1	1
Al	43500	61200	65900	65107	70250	81900
As	3	6	9	12.28	13.5	48
Au	0.001	0.001	0.002	0.00472	0.004	0.067
Ba	555	940	1028	1286	1257	4658
Be	0.5	1	2	1.493	2	2
Bi	0.5	0.5	0.5	0.5423	0.5	1.5
Ca	6200	14250	17000	22751	23150	81600
Cd	1	1	1	1.173	1	3
Ce	35	56	66	68.45	77.5	114
Co	3	8	9	8.613	10	16
Cr	53	93	133	169.1	183.5	739
Cu	12	20.5	25	27.71	30	88
Fe	16700	23650	26900	27299	30450	61100
Ga	10	15	16	16.11	18	21
K	14000	20050	21600	21816	23600	34000
La	21	33	40	39.89	46	71
Li	16	21.5	25	26.13	27.5	117
Mg	2700	6400	7500	9340	9400	50000
Mn	338	668	796	795.6	899.5	1472
Mo	1	3	4	5.413	7	27
Na	3000	11250	13400	12969	15050	19200
Nb	5	9	11	12.13	14	28
Ni	8	15	20	23.75	27	73
P	300	600	700	777.3	850	1700
Pb	14	21.5	27	27.2	30	81
Sb	0.676	1.31	2.09	4.441	3.59	37.6
Sc	4	5	6	6.027	7	9
Sn	2	2	3	2.747	3	6
Sr	110	234.5	271	276.9	315.5	609
Th	6	9	10	10.25	12	23
Ti	2200	3050	3600	3671	4050	10200

V	29	69	89	103.44	122.5	278
Y	13	18	22	24.75	31	56
Zn	47	71.5	93	110.4	123	330

Através dos dados apresentados nas tabelas, já foi possível excluir os elementos **Ag**, **Bi** e **Cd**, por não apresentarem nenhuma variabilidade em seus dados.

### 7.1.2 BOXPLOTS

Com o objetivo de visualizar se há diferenças significativas entre as amostras A e B, *boxplots* foram obtidos para comparação. É importante ressaltar que cada par de elementos foi multiplicado por diferentes fatores para facilitar a visualização dos pares, visto que este ensaio é apenas visual e os diferentes elementos não interagem entre si.

O comando *boxplot* do pacote básico do R foi utilizado para a obtenção dos gráficos.

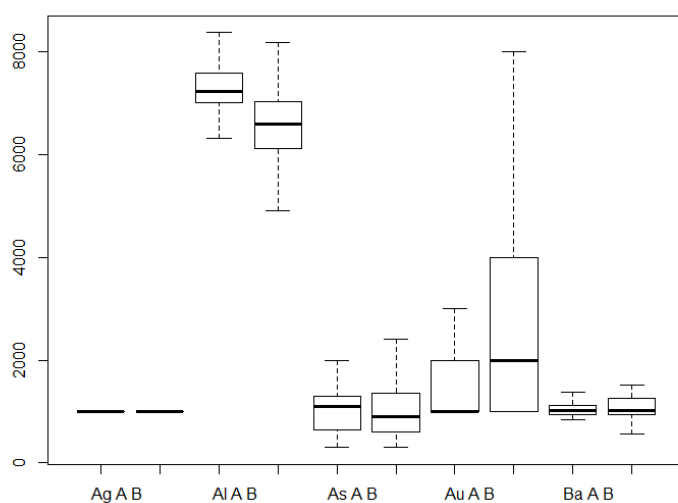


Figura 10 – Boxplot para cada elemento nas áreas A e B. Ag, Al, As e Au, foram multiplicados por  $10^4$ ,  $10^{-1}$ ,  $10^2$  e  $10^6$ , respectivamente.



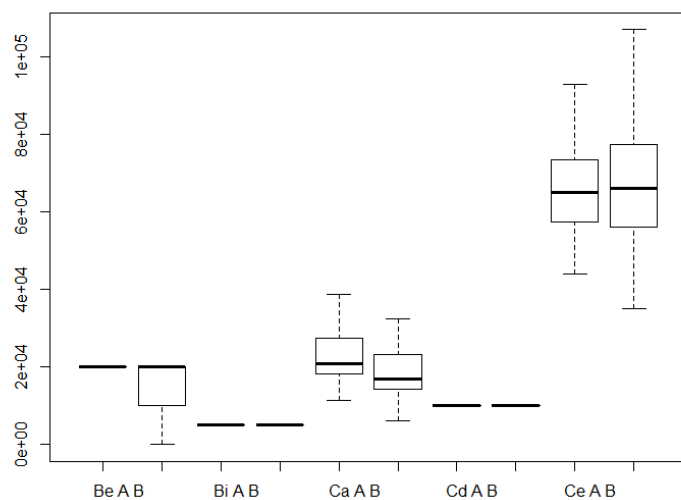


Figura 11 - Boxplot para cada elemento nas áreas A e B. Be, Bi, Cd e Ce foram multiplicados por  $10^4$ ,  $10^4$ ,  $10^4$  e  $10^3$ , respectivamente.

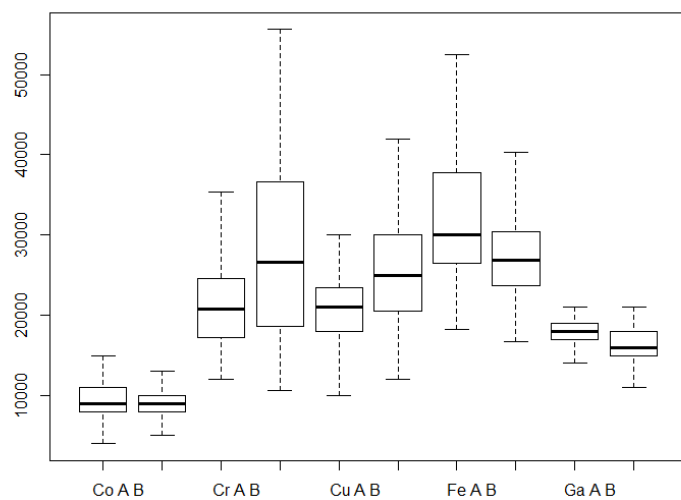


Figura 12 – Boxplot para cada elemento nas áreas A e B. Co, Cu e Ga foram multiplicados por  $10^3$ , enquanto Cr foi multiplicado por 200.

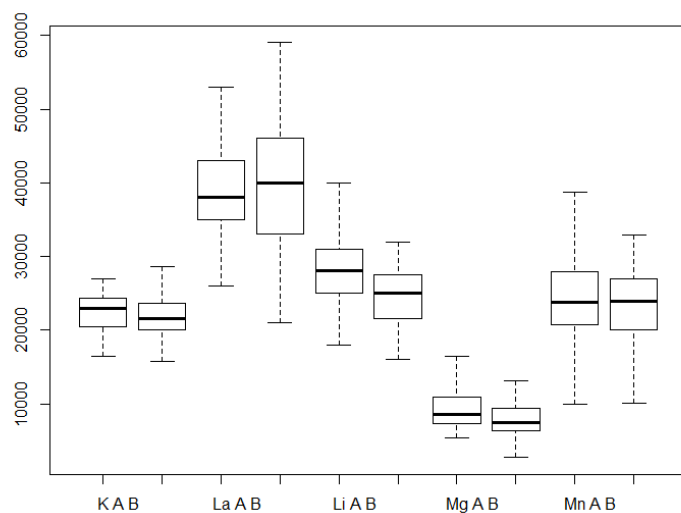


Figura 13 – Boxplot para cada elemento nas áreas A e B. Mn foi multiplicado por 30, enquanto La e Li foram multiplicados por  $10^3$ .

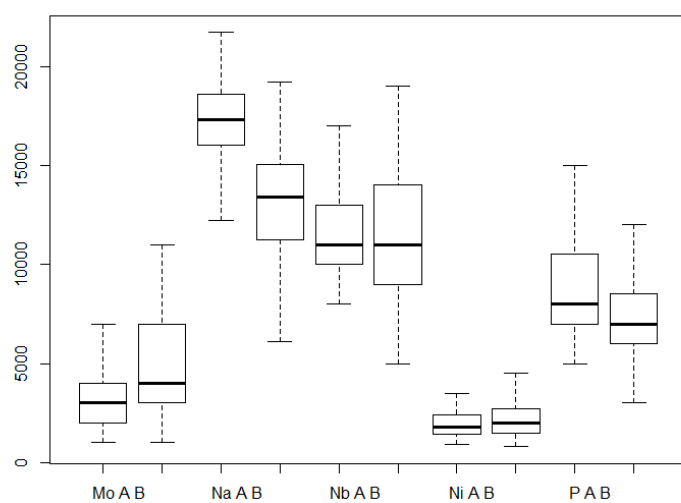


Figura 14 – Boxplot para cada elemento nas áreas A e B. Mo e Nb foram multiplicados por  $10^3$ , enquanto Ni foi multiplicado por 100 e Pb, por 10.

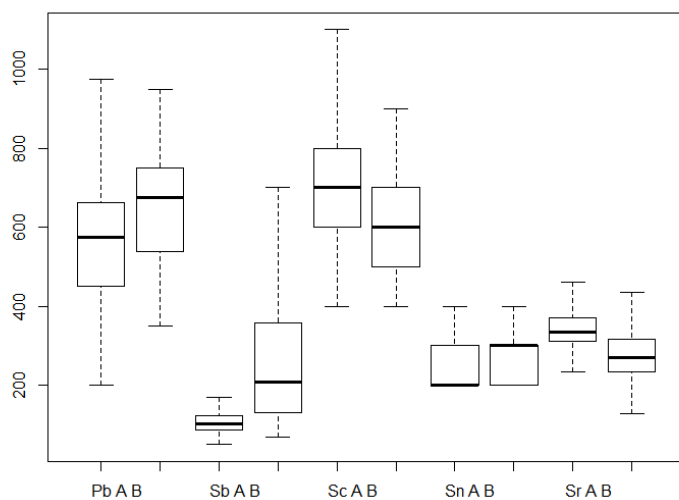


Figura 15 – Boxplot para cada elemento nas áreas A e B. Pb foi multiplicado por 25, enquanto Sb, Sc e Sn, por 100.

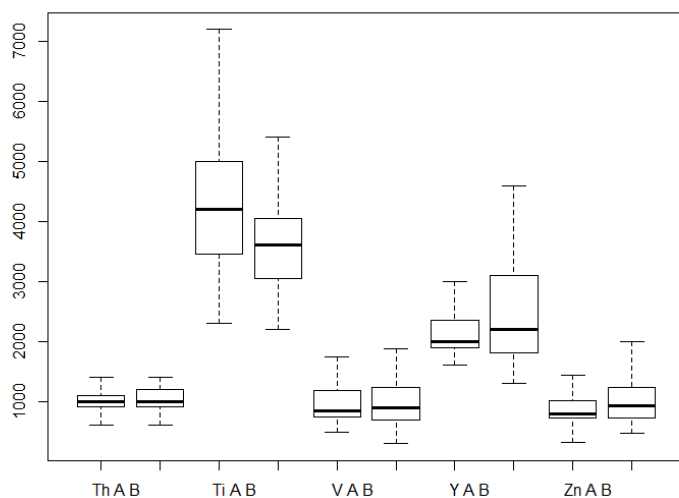


Figura 16 – Boxplot para cada elemento nas áreas A e B. Th e Y foram multiplicados por 100, enquanto V e Zn foram multiplicados por 10.

### 7.1.3 TESTE DE WILCOXON (MANN-WHITNEY)

O teste da soma dos postos de Wilcoxon (*Wilcoxon rank sum test*), também conhecido como teste de Mann-Whitney, é um teste não paramétrico que testa a heterogeneidade de duas amostras. (Dalgaard, 2002)

O comando *wilcox.test* do pacote básico do R foi utilizado para obter os dados.

**Tabela 3:** Teste de Wilcoxon comparando o par de amostras (área A e B) para cada elemento. Se o teste aceita  $H_0$  (p-value  $>10^{-5}$ ), as amostras se comportam da mesma forma. Se o teste rejeita  $H_0$  (p-value  $<10^{-5}$ ), as amostras são heterogêneas.

	W	p-value	$H_0$ :	$H_1$ :		W	p-value	$H_0$ :	$H_1$ :
Al	4257	5.71E-08	X	√	Mg	3505	9.28E-03	√	X
Ag	2812.5	NA	NA	NA	Mn	2984.5	5.19E-01	√	X
As	2939	6.35E-01	√	X	Mo	1414.5	9.23E-08	X	√
Au	1907	1.71E-04	√	X	Na	4746	3.69E-13	X	√
Ba	2545.5	3.17E-01	√	X	Nb	3012	4.52E-01	√	X
Be	3734.5	1.87E-05	√	X	Ni	2535.5	2.98E-01	√	X
Bi	2437.5	1.13E-03	√	X	P	3461.5	1.39E-02	√	X
Ca	3584	3.75E-03	√	X	Pb	1991	2.00E-03	√	X
Cd	2546	2.69E-02	√	X	Sb	896	5.92E-13	X	√
Ce	2677.5	6.13E-01	√	X	Sc	4007	3.62E-06	X	√
Co	3101	2.73E-01	√	X	Sn	2180	6.77E-03	√	X
Cr	1944.5	1.11E-03	√	X	Sr	4422	1.47E-09	X	√
Cu	1853.5	3.08E-04	√	X	Th	2923	6.76E-01	√	X
Fe	3858	8.56E-05	√	X	Ti	3860	8.20E-05	√	X
Ga	4001	6.61E-06	X	√	V	2685	6.33E-01	√	X
K	3247.5	1.02E-01	√	X	Y	2441	1.62E-01	√	X
La	2755.5	8.32E-01	√	X	Zn	2172	1.61E-02	√	X
Li	3862	7.71E-05	√	X					

Idealmente, elementos cujas amostras são rejeitadas pelo teste são os melhores candidatos a formar um *balance* de farejadores, pois o teste evidencia que o comportamento da amostra em uma área mineralizada difere do comportamento em uma área não mineralizada.

Os elementos que aparecem rejeitando  $H_0$  no teste são, portanto, bons candidatos para compor um *balance* de farejadores, porém o teste não elimina a possibilidade de utilizar outros elementos, pois o trabalho envolve a observação dos elementos em diferentes testes para a sua seleção como *balance*.

## 7.2 ESTATÍSTICAS COMPOSICIONAIS

As estatísticas composicionais foram realizadas com um conjunto cujos dados são a junção das amostras das áreas A e B, totalizando 150 amostras.

Para obter os dados da tabela a seguir, o comando *summary.acomp* do pacote *compositions* foi utilizado.

**Tabela 4:** Tabela listando as médias das composições (center) e a matriz de variação de cada elemento em relação ao ouro (Au).

	Center	Variation Matrix (Au)		Center	Variation Matrix (Au)
Ag	5.87E-06	0.847947	Mg	5.13E-02	1.0241527
Al	4.00E-01	0.9615737	Mn	4.59E-03	0.9828636
As	7.55E-05	0.7485378	Mo	3.02E-05	0.8963565
Au	1.46E-08	0	Na	8.49E-02	1.2257049
Ba	6.38E-03	0.805721	Nb	6.70E-05	1.1666777
Be	1.22E-05	1.0605459	Ni	1.17E-04	0.6870474
Bi	3.48E-06	0.8449305	P	4.60E-03	0.9008138
Ca	1.19E-01	1.332387	Pb	1.40E-04	0.77504
Cd	6.37E-06	0.7815718	Sb	1.07E-05	0.6723105
Ce	3.87E-04	1.0006595	Sc	3.87E-05	1.0338687
Co	5.19E-05	0.9829848	Sn	1.44E-05	0.8685729
Cr	7.22E-04	0.8370997	Sr	1.76E-03	1.1061471
Cu	1.35E-04	0.661419	Th	5.83E-05	0.9773422
Fe	1.73E-01	1.0541253	Ti	2.31E-02	1.1298764
Ga	9.87E-05	0.9464207	V	5.49E-04	0.7749914
K	1.28E-01	0.9254633	Y	1.30E-04	0.9923464
La	2.28E-04	0.9822803	Zn	5.39E-04	0.7307452
Li	1.55E-04	0.9138298			

A tabela acima fornece importantes informações sobre os possíveis farejadores, através da matriz de variação. Quanto menores os valores apresentados (mais próximos de 0), significa que as composições destes elementos “se aproximam” da composição do ouro. O oposto também é válido, onde os maiores valores, mais distante de 0, demonstram falta de proporcionalidade entre o elemento e o ouro.

Através da tabela alguns elementos se destacam positivamente, como arsênio (As), cobre (Cu), níquel (Ni), antimônio (Sb) e zinco (Zn). Da mesma forma, alguns elementos se destacam negativamente, como cálcio (Ca), sódio (Na), nióbio (Nb), estrôncio (Sr) e titânio (Ti).

### 7.3 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

O gráfico de PCA foi obtido pelo comando `pcaCoDa` do pacote *robCompositions* e o comando *biplot* do pacote básico do R.

O PCA apresentado a seguir foi obtido com o conjunto de dados englobando ambas áreas A e B,

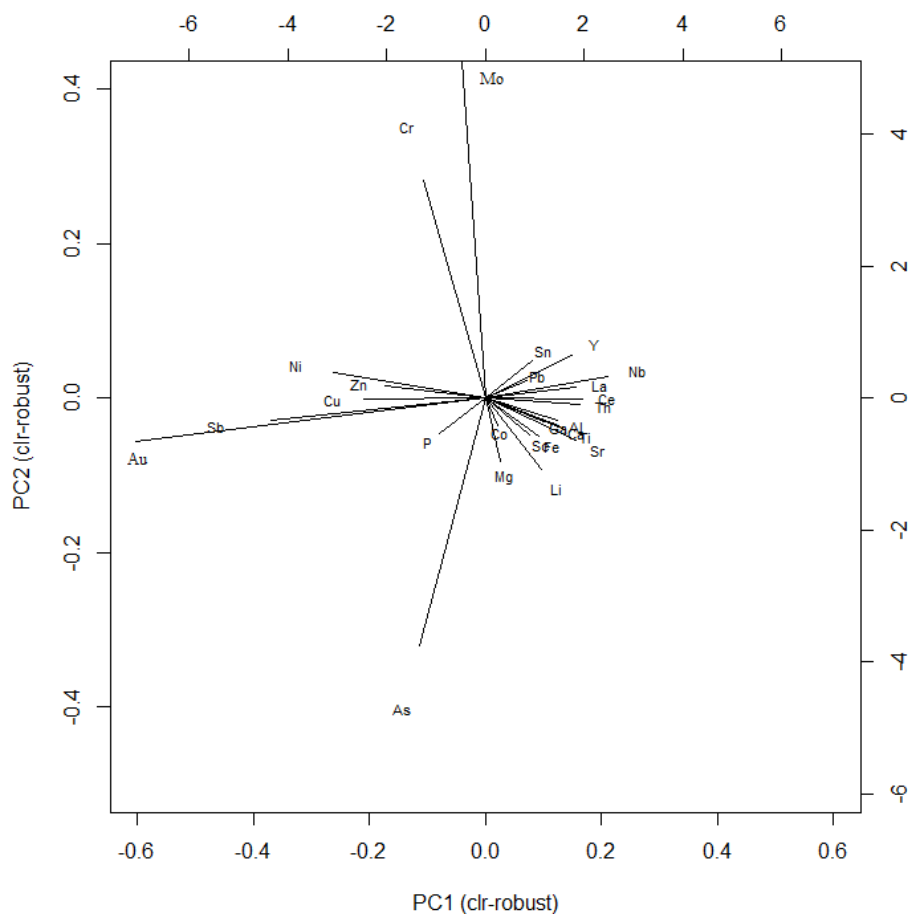


Figura 17 - PCA composicional das amostras A e B em conjunto.

Neste caso, o **Sb** se destaca como um elemento de grande proporcionalidade com o ouro, enquanto **Nb** (em maior destaque), **Y**, **La**, **Ce** e **Th** são os elementos menos proporcionais.

#### 7.4 A ESCOLHA DOS FAREJADORES

Todas as informações obtidas até este momento foram então compiladas, sendo a matriz de variação e o PCA os testes considerados mais importantes para a decisão de escolher quais serão os elementos a compor o *balance* de farejadores.

O antimônio (Sb) foi escolhido como o elemento com maior proporcionalidade com o ouro, demonstrado em conjunto pelo PCA e sua matriz de variação, além de possuir um comportamento diferente entre as amostras A e B, como evidenciado pelo teste de Wilcoxon.

Para fazer oposição ao **Sb**, foi escolhido o **Nb**, que, apesar de ter aceitado  $H_0$  no teste de Wilcoxon, possui resultados coerentes e de “oposição” ao ouro no PCA e matriz de variação.

#### 7.5 DIAGRAMA TERNÁRIO

Para compor o diagrama ternário de composições, um terceiro elemento foi necessário, para fazer oposição ao **Sb**, em conjunto com o **Nb**. O elemento escolhido foi o **Y**, que se destacou no PCA composicional fazendo oposição ao ouro.

O diagrama ternário foi adquirido com a função *plot* do pacote *robustbase*.

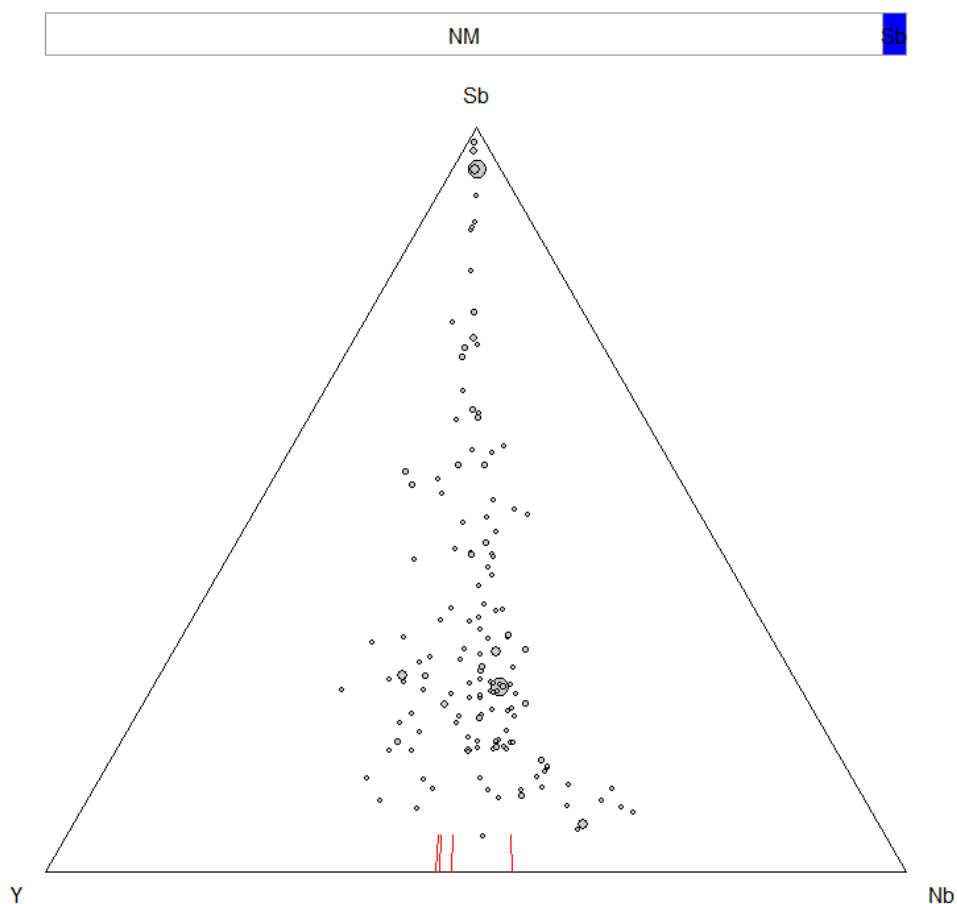


Figura 18 - Diagrama ternário composicional mostrando a influência de cada composição entre si.

O diagrama é, na verdade, um diagrama ternário *bubble*, ou seja, os pontos mostram o comportamento das composições entre si, enquanto o tamanho das bolas varia de acordo com o teor de ouro, apenas de forma ilustrativa. O diagrama mostra a proporção entre as três variáveis sem a influência das demais e, como já mencionado por Van Den Boogart & Tolosana-Delgado (2013), mostra os dados como eles realmente são. Neste caso, tanto o **Nb**, quanto o **Y** não exercem uma influência individual muito forte, se comparados ao **Sb**.



## 7.6 RESULTADOS DA UTILIZAÇÃO DO BALANCE

### 7.6.1 DISPERSOGRAMA

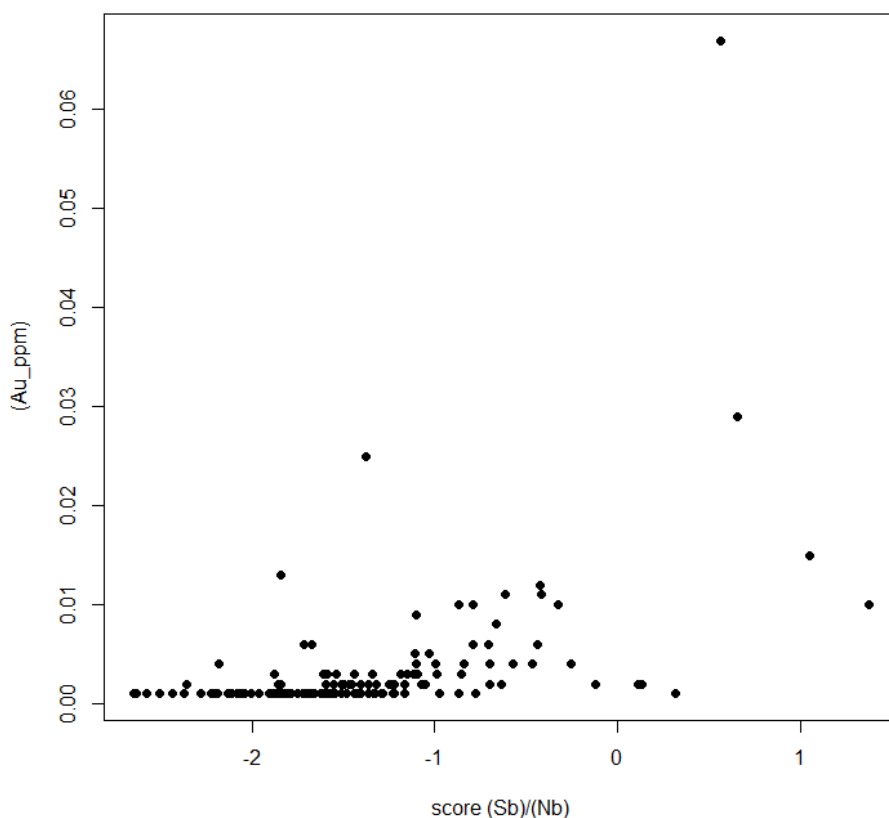


Figura 19 - Dispersograma apresentando a relação entre os teores de ouro (Au) e os valores do score, calculado pelo balance entre Sb e Nb.

Da mesma forma que o diagrama ternário, o dispersograma também foi adquirido pela função *plot*.

O dispersograma é o primeiro dos dois resultados obtidos pela utilização, de fato, do *balance* de farejadores. Há no gráfico uma evidente tendência de crescimento dos teores de ouro conforme o aumento do *score*.

A escala do score apresentada não reflete da melhor forma o resultado, pois apresenta com valores negativos o início da tendência de crescimento, apesar de esta tendência ser um resultado positivo evidenciado pelo método. A escala pode ser modificada aplicando uma correção que tornaria a tendência positiva, porém tal manobra foi considerada desnecessária,

visto que o resultado é apenas uma representação visual e nenhuma linha de regressão ou tendência será traçada.

### 7.6.2 BUBBLEPLOTS

O gráfico foi adquirido pelas funções *coordinates* e *bubble*, do pacote *sp*, além de utilizar o *balance* produzido pelo pacote *compositions*.

O *score* apresentado no gráfico abaixo foi corrigido em +1, para que o gráfico considerasse as amostras que fazem parte do *trend* de aumento do teor de ouro conforme o aumento do *score*, como positivas, para que estas aparecessem com a cor vermelha no plot, facilitando assim a visualização do resultado.

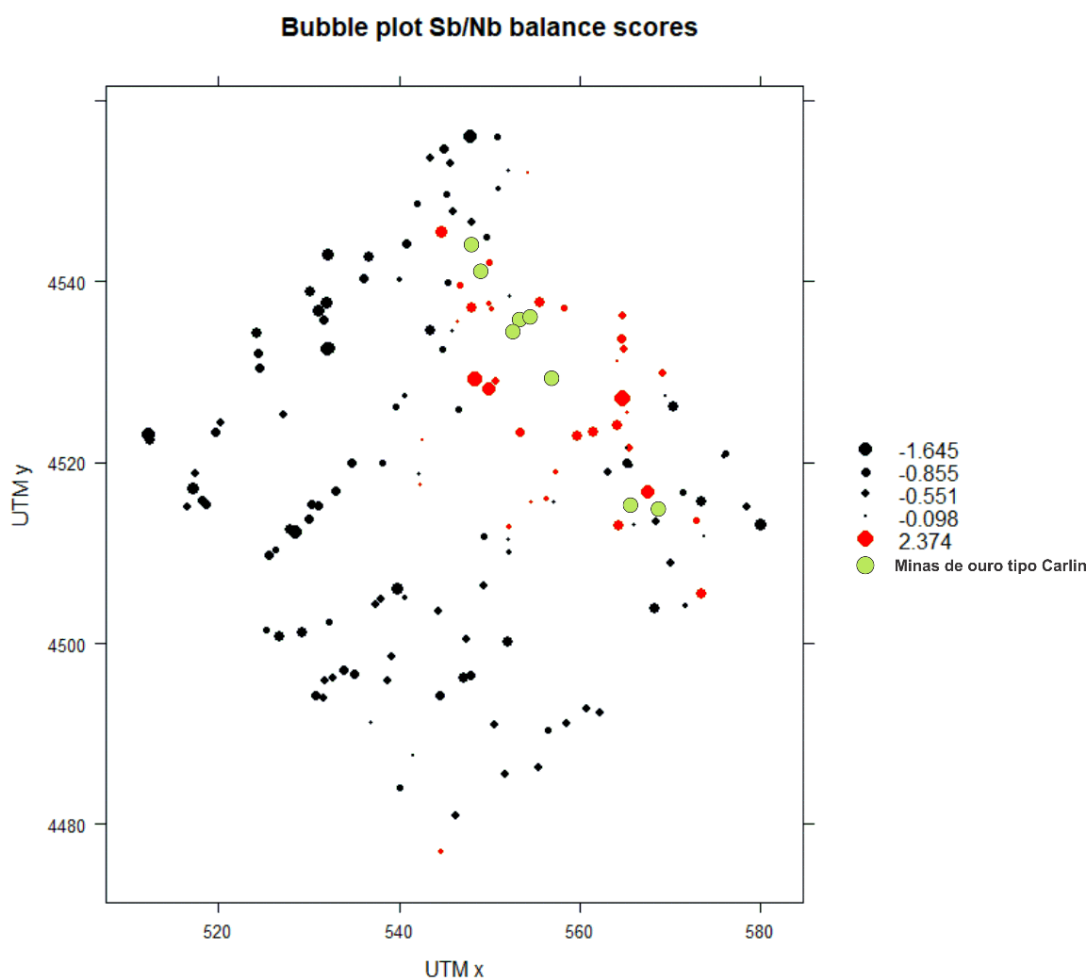


Figura 20 - Bubble plot mostra as diferenças entre as áreas A e B baseado no sinal geoquímico expresso como o balance de Sb sobre Nb, aplicada uma correção de +1 no score.

O resultado obtido representa bem a diferença entre as áreas A e B, quanto ao potencial de farejamento do *balance* entre **Sb** e **Nb**. A área mineralizada engloba todos os scores positivos, distribuídos de maneira similar ao *trend* de minas de ouro tipo Carlin.

## 8. DISCUSSÕES

Foi considerado que o método cumpriu o seu papel de reforçar o sinal geoquímico das amostras. A distinção entre as áreas A e B no *bubble* ficou evidente, mostrando que a escolha dos elementos para compor o *balance* foi correta, validando assim os resultados obtidos pelo PCA sobre a proporcionalidade existente entre o ouro e o antimônio, assim como a falta de proporcionalidade com o nióbio.

Porém, apesar dos resultados, acredita-se que estes podem ser ainda melhores, devido a natureza dos dados, como discutido a seguir.

### 8.1 NATUREZA DOS DADOS

O primeiro fator é o tipo de amostra usada, pois como já mencionado no tópico 4.2.1, as amostras coletadas são de sedimentos de corrente e apresentam baixas concentrações de diversos metais, incluindo o ouro.

Os dados são antigos, coletados em três campanhas diferentes, sendo os mais antigos reanalisados na ocasião da análise geoquímica dos dados mais recentes. Além de o objetivo das análises não ter sido a prospecção de ouro e sim a avaliação de urânio.

Há também a falta de alguns elementos que, pela literatura (Cline *et al.* 2005; Emsbo *et al.* 2003), são considerados muito relacionados ao ouro tipo Carlin, como o mercúrio (Hg), tálio (Tl) e telúrio (Te).

Tais motivos levam a crer que, de posse de um conjunto de dados ideal, de análises geoquímicas com o objetivo de prospecção mineral, os resultados obtidos podem ser ainda mais satisfatórios.

### 8.2 O FATOR GEOLÓGICO

Um dos maiores desafios do método é integrar os resultados a geologia local, pois é necessário que haja sentido entre os farejadores escolhidos e o contexto geológico da área. Neste sentido, o antimônio não teve problemas, pois teve seu enriquecimento nas rochas

associado a formação dos CTGD's. (Emsbo *et al.* 2003; Cline *et al.* 2005; Patterson & Muntean, 2011)

Já o nióbio, apesar dos resultados do PCA e matriz de variação, do ponto de vista geológico, não apresenta uma relação de desproporcionalidade tão evidente em relação ao ouro, por se tratar de um elemento imóvel. Emsbo *et al.* (2003), ainda menciona que amostras altamente concentradas exibiram um aumento na concentração de elementos imóveis, devido a perda de massa de até 25%.

No entanto, a presença do nióbio no *balance* reforça o papel do método, não apenas para apontar áreas potencialmente mineralizadas, mas também para confirmar as áreas que não são. Pois, assumindo que o seu comportamento seja imóvel, a variação dos valores do *score* é ainda mais dependente do antimônio, reforçando que *scores* baixos apontam áreas onde não há forte relação **Sb/Au**. Um papel talvez ainda mais importante, pois evita a identificação de falsos positivos, o que traria custos indesejados no caso de uma atividade exploratória.

## 9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho foi um refinamento dos trabalhos apresentados por BRAGA L. (2018) em Olomouc e BRAGA, J. (2018) no Rio de Janeiro, modificando as áreas de estudo de modo a concentrar a análise em uma área menor, obtendo resultados melhores e mais coerentes.

O método tem em suas limitações a impossibilidade de ser utilizado em uma análise exploratória inicial, pois depende da coleta e análise geoquímica dos dados e estudos geológicos prévios da região. Porém, como parte de estudos posteriores de investigação ou onde seguir placers não é possível, seu papel pode ser de grande valor.

A abordagem composicional, neste caso, foi usada com a intenção de identificar farejadores de ouro. No entanto, o método não é engessado a um único elemento e tal abordagem pode ser aplicada em quaisquer elementos desejados. Os únicos requisitos são a presença de dados geoquímicos, contextos geológicos similares entre as áreas e, se possível, controles para provar as mineralizações (como minas já em fase de exploração).

### 9.1 PRÓXIMOS PASSOS

As etapas apresentadas no trabalho são a fase de treinamento do método. A partir daí, é aplicada uma metodologia geoestatística, realizando uma variografia e krigagem composicional baseada no *balance* encontrado, aplicada a uma terceira área (Área C), também mineralizada como controle, produzindo um gráfico interpolando os scores na nova área.

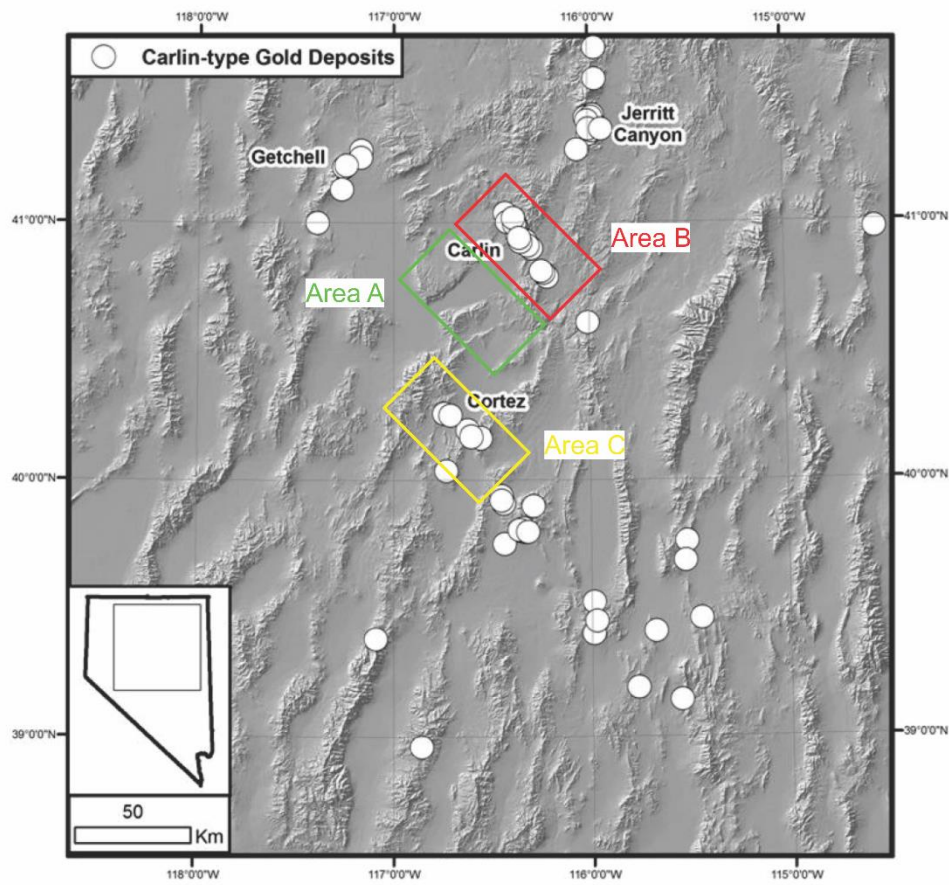


Figura 21 - Mapa da região de Nevada onde se concentram os *trends* de minas tipo Carlin, mostrando a área C em amarelo. Modificado de Patterson & Muntean (2011)

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITCHISON, J. The statistical analysis of compositional data. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 1982. Vol. 44, nº 2, pp. 139-177

BETTLES, K. H. Exploration and geology, 1962 to 2002, at the Goldstrike property, Carlin trend, Nevada. *Economic Geology Special Publication 9*, 2002. p. 275–298.

BRAGA, J.; BRAGA, L. Utilização de análise composicional de componentes principais para identificação de elementos farejadores de ouro. In: 49º Congresso Brasileiro de Geologia, 2018, Rio de Janeiro. Sociedade Brasileira de Geologia, 2018. p. 1407

BRAGA, L.; BRAGA, J. Mapping gold pathfinder metal ratios in northern Nevada, US – A compositional analysis approach. In: 19<sup>th</sup> Annual Conference of the International Association for Mathematical Geosciences, 2018, Olomouc. International Association for Mathematical Geoscience, 2018. p. 99-100.

BRAGA, L. P.; PORTO, C.; SILVA, F.; BORBA, R. Mapping gold pathfinder metal ratios – A methodological approach based on compositional analysis of spatially distributed multivariate data. 35th International Geological Congress, 2016. Cape Town, South Africa. Abstract 1055.

Disponível em <<https://www.americangeosciences.org/sites/default/files/igc/1055.pdf>>

BURCHFIEL, B. C.; DAVIS G. A. Nature and controls of cordilleran orogenesis, western United States: Extensions of an earlier synthesis. *American Journal of Science*, 1975. v. 275-A, p. 363-396.

CLINE, J. S.; HOFSTRA, A. H.; MUNTEAN, J. L.; TOSDAL, R. M.; HICKEY, K. A. Carlin-Type Gold Deposits in Nevada: Critical Geologic Characteristics and Viable Models. *Economic Geology 100th Anniversary*, 2005 Volume pp. 451–484.

COOMBS, M. J., KOTLYAR, B. B., LUDINGTON, S.; FOLGER, H. W.; MOSSOTTI, V. G. Multielement Geochemical Dataset of Surficial Materials for the Northern Great Basin: U.S. Geological Survey Open-File Report 02-227, 2002.

Disponível em <<https://pubs.usgs.gov/of/2002/0227/>>

DALGAARD, P. *Introductory Statistics with R*. New York: Springer. 2002.

DICKINSON W. R.; HARBAUGH D. W.; SALLER, A. H.; HELLER P. L.; SNYDER, W. S. Detrital modes of upper Paleozoic sandstones derived from Antler orogen in Nevada: implications for nature of Antler orogeny. *American Journal of Science*, 1983. v. 283, p. 481-509.

EMSBO, P.; HUTCHINSON, R. W.; HOFSTRA, A. H.; VOLK, J. A.; BETTLES, K. H.; BASCHUK, G. J.; JOHNSON, C. A. Syngenetic Au on the Carlin trend: Implications for Carlin-type deposits: *Geology*, 1999 v. 27, p. 59–62.

EMSBO, P.; HOFSTRA, A. H.; LAUHA, E. A.; GRIFFIN, G. L.; HUTCHINSON, R. W. Origin of high-grade gold ore, source of ore fluid components, and genesis of the Meikle and



neighboring Carlin-type deposits, northern Carlin trend, Nevada: *Economic Geology*, 2003. v. 98, p. 1069–1100.

FILZMOSER, P.; HRON, K.; REIMANN, C. Principal component analysis for compositional data with outliers. *The 18th TIES Conference: Computational Environmetrics: Protection of Renewable Environment and Human and Ecosystem Health*, 2009. 20, p. 621-632.

GRANT, J. A. The isocon diagram — a simple solution to Gresen's equation for metasomatic alteration. *Economic Geology*, 1986 v. 81, p. 1976–1982.

KÜRZL, M. Exploratory data analysis: recent advances for the interpretation of geochemical data. *Journal of Geochemical Exploration*, 1988. v. 30, p. 309-322.

LI, Z.; PETERS S. G. Comparative Geology and Geochemistry of Sedimentary- Rock-Hosted (Carlin-Type) Gold Deposits in the People's Republic of China and in Nevada, USA. U.S. Geological Survey Open-File Report 98-466, 1998.

MCQUEEN G. K.; MUNRO D. C. Weathering-Controlled Fractionation of Ore and Pathfinder Elements at Cobar, NSW. *Advances in Regolith*, 2003. p. 296-300.

NILSEN, T. H.; STEWART J. H. The Antler orogeny – mid-Paleozoic tectonism in western North America. *Geology*, 1980. v. 8, p. 298-302.

PATTERSON, L. M.; MUNTEAN J. L. Multi-element geochemistry across a Carlin-type gold district: Jerrett Canyon, Nevada. *Geological Society of Nevada 2010 Symposium*, 2011. P. 1119-1151.

PAWLOWSKY-GLAHN, V.; OLEA, R. A. *Geostatistical analysis of compositional data*. New York. Oxford University Press, 2004 v.7, 304p.

PAWLOWSKY-GLAHN, V.; EGOZCUE, J. J.; TOLOSANA-DELGADO, R. *Modeling and Analysis of Compositional Data*. 1ª Ed. West Sussex: Wiley, 2015. ISBN: 9781118443064

PEBESMA, E.; BIVAND, R. S. *Classes and methods for spatial data: the **sp** package*. 2005. Disponível em <<https://cran.r-project.org/package=sp>>

PRICE, J. G. *Geology of Nevada*. Nevada Bureau of Mines and Geology Special Publication, 2003. v. 33, p. 1-10.

PRIHAR, D. W.; PETERS, S. G.; BOURNS, F. T.; and MCKEE, E. H. Geology and gold potential of the Goat Ridge Window, Shoshone Range, Lander County, Nevada. *Geological Society of Nevada Symposium Proceedings*, Reno/Sparks, Nevada, April 1996, pp. 485-504.

R CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, 2014. Vienna, Austria. Disponível em <<http://www.R-project.org/>>

RUNKLE, J.; KUNKLE K. E.; CHAMPION S., EASTERLING D. 2017: Nevada State Climate Summary. NOAA Technical Report NESDIS 149-NV, 4 pp. Disponível em <<https://statesummaries.ncics.org/nv>>

SMITH, S. M. National geochemical database - reformatted data from the National Uranium Resource Evaluation (NURE) Hydrogeochemical and Stream Sediment Reconnaissance (HSSR) program, version 1.20: U.S. Geological Survey Open-File Report 97-492. 2000 Disponível em <<http://geology.cr.usgs.gov/pub/open-file-reports/ofr-97-0492>>

SPEED, R. C.; SLEEP, N. H. Antler orogeny and foreland basin: a model. Geological Society of America Bulletin, 1982. V. 93, p. 815-828.

STEWART, J. H.; CARLSON, J. E. 1978, Geologic Map of Nevada: U.S. Geological Survey and Nevada Bureau of Mines and Geology, 1:500.000 (not part of any formal series, printed and distributed by the U.S. Geological Survey, G75163, reprinted, 1981, G81386). Disponível em <<https://mrdata.usgs.gov/geology/state/state.php?state=NV>>

TEMPL, M.; HRON K.; FILZMOSE P. (2011). robCompositions: Robust Estimation for Compositional Data. Manual and package, version 1.4.4.

THORIN L. Trees and shrubs. National Park Service, 2002. Disponível em <<https://www.nps.gov/grba/learn/nature/treesandshrubs.htm>>

VAN DEN BOOGAART, K. G.; TOLOSANA-DELGADO, R. Compositional data analysis with 'R' and the package 'compositions'. Geological Society, 2006. Special Publications, 264, p. 119-127.

VAN DEN BOOGAART, K. G.; TOLOSANA-DELGADO, R. Analyzing compositional data with R. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. XV, 258p.

WINTERBURN, P. A.; NOBLE, R. R. P.; LAWIE, D. Advances in Exploration Geochemistry, 2007 to 2017 and beyond. Geochemistry, 2017. Paper 34, p. 495-504.