



***APLICAÇÃO DOS SISTEMAS DE INFORMAÇÃO
GEOGRÁFICA AO SECTOR MINERAL***

Caso de estudo: Região da Jamba-Angola

António Valter Chissingui

***Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do
grau de Mestre em Ciência e Sistemas de Informação Geográfica***

**Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação
da Universidade Nova de Lisboa**

APLICAÇÃO DOS SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA AO SECTOR MINERAL.

Caso de estudo: Região da Jamba - Angola

Dissertação orientada por

Professor Doutor Marco Octávio Trindade Painho

Novembro de 2010

AGRADECIMENTOS

Um trabalho desta natureza é quase sempre realizado com o suporte de outras pessoas.

Agradeço em primeiro lugar a Deus Pai Todo Poderoso pelo dom da vida e pelas bênçãos que muito tenho recebido.

Agradeço ao Professor Doutor Marco Painho, pela paciência e orientação deste trabalho.

Agradeço ao Professor Doutor José Tenedório da FCSH, pela ajuda e conselhos na área de detecção remota.

Ao pessoal do laboratório de novas tecnologias do ISEGI e todos outros funcionários que directa ou indirectamente contribuíram para que este trabalho chegasse ao fim.

A minha Mãe e irmãos pela força que me deram nos primeiros momentos da formação.

Aos meus amigos, Hélder, Yoenls, Adolosi, Cameia, Milagres, Ruben, Hequer, Emília Dias, Nelita, Ganito e aos Senhores Pacavira e Borges do Consulado de Portugal em Benguela.

A minha esposa Márcia e o meu filho Vatiel pela compreensão durante as longas ausências.

A todos o meu muito obrigado

APLICAÇÃO DOS SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA AO SECTOR MINERAL

CASO DE ESTUDO: REGIÃO DA JAMBA – ANGOLA

RESUMO

Há ainda pouco conhecimento sobre o potencial mineral de Angola devido a exiguidade dos estudos feitos até ao presente. Nesta fase procura-se fomentar o sector mineral e uma das várias tecnologias que pode ser utilizada é a tecnologia SIG.

A gestão mineral é uma área que muito tem beneficiado dos desenvolvimentos dos SIG e da detecção remota. Os SIG quando usados na gestão mineral como recurso a abordagens e modelos especializados, permitem a caracterização e até a descoberta de novos jazigos e ocorrências minerais.

A metodologia aplicada na integração de dados em ambiente SIG foi o método dos pesos de evidência que para este trabalho mostrou ser muito útil. Neste trabalho em particular, o método dos pesos de evidência tornou possível a combinação de evidências como geologia, geoquímica e as zonas de alteração hidrotermal, com base em operações de análise espacial, em ambiente *ArcSDM*.

Os resultados deste estudo foram a criação do mapa de aptidão mineral de ferro para a região da Jamba em Angola, que realça os benefícios da utilização da tecnologia SIG em estudos desta natureza.

O conhecimento das várias correlações entre as variáveis usadas no estudo e o produto final que é o mapa de aptidão mineral.

A apresentação das vantagens da aquisição e utilização de dados digitais, para desenvolvimento do sector mineral no país e, da Jamba em particular, para correcção de eventuais lacunas existentes.

APPLICATION OF GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS FOR MINERAL SECTOR

CASE STUDY: REGION OF JAMBA - ANGOLA

ABSTRACT

The mineral potential of Angola has not yet been studied properly because of the exiguity of the studies available. On this stage means of stimulation of the mineral sector are being searched for, GIS technology being one of the many technologies possible to be applied.

GIS development and Remote Sensing have contributed a lot to the mineral resources management area. The GIS used in the mineral resources management as a resource for special approaches and models, permit characterization and even discovery of new mineral deposits and occurrences.

Method of weights of evidence was the one applied in the integration of GIS environment data, which proved to be very efficient. In this particular work, method of weights of evidence has made possible combination of evidence, such as geology, geochemistry, hydrothermal alteration zone, being based on the operations of space analysis, as well as in the ArcSDM environment.

The study resulted in creation of a map of iron mineral favourability for the region of Jamba, Angola, which highlights the benefit of utilization of GIS technology in this type of research.

The information about different correlations was used in this study, and the final product is provided by the map of iron mineral favourability.

Digital data acquisition and utilization is advantageous for the development of the mineral sector in Angola in general, and in Jamba in particular, and contributes to the correction of the eventual existent gaps.

PALAVRAS - CHAVE

Aptidão

Mineral

Pesos de evidência

Sistemas de Informação Geográfica

Tema de evidência

KEYWORDS

Favorability

Mineral

Weights of evidence

Geographic Information Systems

Theme of evidence

ÍNDICE

-AGRADECIMENTOS-----	II
-RESUMO-----	III
-ABSTRACT-----	IV
-PALAVRAS CHAVE-----	V
-KEYWORDS-----	VI
ÍNDICE-----	VII
-ÍNDICE DE FIGURAS-----	IX
-ÍNDICE DE TABELAS-----	X
1-INTRODUÇÃO-----	1
1.1- Enquadramento-----	1
1.2- Objectivos -----	4
1.3- Metodologia-----	6
1.4- Enquadramento Geográfico-----	6
1.5- Estrutura da Dissertação-----	7
2- A exploração mineira-----	10
2.1-Generalidades-----	10
2.2-A exploração mineira em Angola-----	12
2.3- A exploração do mineiro de Ferro em Angola-----	16
2.4-O ferro de Cassinga-Jamba-----	19
2.4.1- Geologia da Jamba-----	20
2.5- Tipos de jazigos de ferro-----	22
2.6 - Os métodos geofísicos-----	24

2.6.1- O método magnético-----	25
2.7- Os métodos geoquímicos-----	28
3- Os Sistemas de Informação Geográfica-----	31
3.1-Definições de SIG-----	34
3.2-Evolução histórica dos SIG-----	35
3.3- Componentes de um SIG-----	40
3.4- Os SIG aplicados ao sector mineral-----	46
3.4.1-Exemplos de aplicações dos SIG ao sector mineral-----	53
4- Processamento e integração dos dados espaciais e alfanuméricos para determinação do potencial mineral-----	58
4.1-Conversão de pontos em áreas e superfícies-----	59
4.2-Área de estudo-----	61
4.3-Factor ocorrências minerais-----	61
4.4-Factor geofísico-----	63
4.5- Factor geoquímico-----	63
4.6- Factor geológico-----	66
4.7-Factor alteração hidrotermal-----	66
4.7.1- Características do satélite Landsat-----	67
4.8- Integração dos dados pelo método dos pesos de evidência-----	75
5- Resumo e conclusões-----	84
6-Referências bibliográficas-----	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área de estudo-----	8
Figura 2. Extracto da carta geológica de Angola-----	15
Figura 3. Principais jazigos de ferro de Angola-----	18
Figura 4. Mapa geológico da Jamba-----	21
Figura 5. Mapa estratigráfico da Jamba-----	22
Figura 6. Componentes dum SIG-----	40
Figura 7. Representação vectorial-----	43
Figura 8. Representação raster-----	44
Figura 9. Modelo de exploração-----	47
Figura 10. Fluxograma das operações de análise espacial-----	58
Figura 11. Fluxograma do factor ocorrências minerais-----	63
Figura 12. Mapa das ocorrências minerais-----	64
Figura 13. Mapa de anomalias geoquímicas-----	65
Figura 14. Mapa do Factor geológico-----	66
Figura 15. Imagem da composição colorida 742-----	69
Figura 16. Imagem sem efeito atmosférico-----	70
Figura 17. Imagem da razão de bandas 3/1 -----	71
Figura 18. Imagem da análise em componentes principais-----	73
Figura 19. Curva de reflectância espectral da Hematite-----	74
Figura 20. Imagem das zonas de alteração hidrotermal-----	74
Figura 21. Temas de evidência-----	77
Figura 22. Mapa da probabilidade posterior-----	80
Figura 23. Mapa de aptidão do ferro na área de estudo-----	82

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Principais minerais exportados entre (1964-1973) -----	13
Tabela 2. Susceptibilidade magnética de algumas rochas e minerais-----	26
Tabela 3. Valores do índice de <i>Clarke</i> -----	29
Tabela 4. Características dos modelos raster e vectorial-----	45
Tabela 5. Tipos de abordagens SIG usadas no mapeamento mineral-----	52
Tabela 6. Classificação dos métodos de interpolação-----	62
Tabela 7. Características das bandas do <i>Landsat ETM</i> -----	68
Tabela 8. Razão de bandas-----	71
Tabela 9. Variâncias das bandas <i>Landsat</i> -----	72
Tabela 10. Probabilidade posterior resultante da integração dos temas de evidência-----	81

1- INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Desde longa data que a riqueza mineral de Angola tem suscitado grande atenção de estudiosos, políticos, economistas e muitos outros, o que tem servido como um elemento importante nas várias parcerias do país com o estrangeiro.

De facto, o país, inclusivamente os seus respectivos vizinhos, designadamente a Namíbia e a África do Sul, situa-se numa região muito rica em diamantes e não só, devido a condições geológicas particularmente favoráveis a estas ocorrências minerais.

Constitui prerrogativa de cada Estado possuir o conhecimento do potencial mineiro do seu solo, do subsolo, do mar, e demais áreas sob sua jurisdição, em que o mesmo exerce a soberania (Araújo et al, 2001).

A primeira legislação mineira no período pós-independência depositou nas instituições do Estado as atribuições da investigação do território para investigação dos seus recursos minerais; é assim que a Lei n.º 5/79 definiu uma política mineira em que o Estado participava em todas as fases desde a descoberta até à exploração dos recursos minerais (Idem).

De facto, para um país em desenvolvimento, com grande extensão territorial como Angola, enfrentando enormes necessidades, estudos realizados apenas pelos organismos estatais foram e têm sido ainda insuficientes para o conhecimento adequado das suas potencialidades minerais.

A liberalização da economia nos anos 90 foi sentida também no campo da geologia e mineração. Por tudo isto, aprovou-se a lei das actividades geológicas e mineiras, publicada com a designação de Lei de Minas nº 1/92 e sequencialmente a Lei nº 16/94-Lei dos Diamantes. Esta nova legislação, possibilitou a obtenção por parte das empresas privadas, de concessões

com direitos mineiros de prospecção, pesquisa, exploração e comercialização de recursos minerais (Araújo et al, 2001).

O novo quadro em termos de legislação impulsionou grandemente o sector mineiro no país, mas a necessidade de mais estudos era e é-o ainda de grande importância.

Embora em Angola já se tivesse sido identificada e caracterizada uma vasta gama de formações geológicas, tivessem sido estabelecidas correlações estratigráficas e promovidos numerosos estudos petrográficos, mineralógicos e paleontológicos, ainda se está muito longe de um suficiente conhecimento da geologia e das características do território.

Angola é justamente daqueles países onde, devido à sua vastidão, às dificuldades de penetração e às condições geomorfológicas, é mais difícil e dispendioso obter, a curto prazo, um conhecimento suficiente da geologia e efectuar um inventário exaustivo da sua riqueza mineral.

Em virtude da grande dificuldade na obtenção rápida do conhecimento geológico pormenorizado do território, impõe-se o recurso a métodos e técnicas específicas e aperfeiçoadas, que constituem nos dias que correm poderosos meios para, em determinadas condições, localizar e caracterizar jazigos de substâncias minerais úteis em regiões onde sejam escassas as informações de carácter geológico.

Entre as várias tecnologias a usar nesta fase de fomento do sector mineral, destacamos os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que são uma tecnologia nova e de grande utilidade para estes estudos.

Um SIG é fundamentalmente um sistema de administração de base de dados, com potencial para armazenar, manipular e exhibir dados geográficos. O propósito de um SIG é prover uma ligação entre os vários elementos do espaço, para o uso inteligente dos recursos naturais (Zeiler, 1999).

Na área das geociências, os SIG têm sido aplicados em estudos de recursos minerais, em mapeamentos geotécnicos e na selecção de áreas de depósitos de lixo, entre outras aplicações (Quadros, 2000).

Os SIG comerciais têm possibilitado a execução de estudos geológicos, suportados por grandes quantidades de dados espaciais, de seus atributos associados, nos mais variados formatos (Idem).

Existem várias aplicações baseadas nos SIG, estes são importantes na tomada de decisões, descobertas de novas minas, coordenação de projectos, padronização de dados, logística, etc. Mineração não é apenas exploração, mas um aglomerado de aplicações com base na geoinformação (InfoGEO, 2007).

Segundo Carranza, et al (2008), a exploração mineral é uma tarefa complexa que, frequentemente, requer o uso da detecção remota, dados geoquímicos, geofísicos e geológicos para se alcançar resultados satisfatórios. Isto torna necessária a utilização de múltiplas camadas de informação, o que faz dos SIG uma ferramenta popular entre os geólogos, por permitir uma integração mais efectiva da informação e uma análise de grande quantidade de dados espaciais com diferentes atributos e formatos.

Partington (2000) afirmou que muitas companhias mineiras construíram grandes bases de dados geológicas que representam activos de milhões de dólares, adquiriram programas que usam dados digitais que permitem a utilização de dados probabilísticos aos quais os métodos tradicionais não dão resposta. Os SIG são a ferramenta perfeita para a compilação e administração destes dados espaciais em estudos geológicos e minerais.

Calazans e Domingues (2007) sugerem que a utilização de um SIG para a mineração é de grande importância, pois a sua aplicação é muito ampla, podendo oferecer informações sobre base de dados: cartografia geológica, topografia, imagens de satélite e infra-estrutura; pesquisa mineral: planeamento, integração, análise espacial avançada, mapeamento geológico e modelagem de depósitos; geotecnia/hidrogeologia: gestão de barragens,

poços e modelagem 3D; gestão ambiental: gestão de risco e sistemas de emergência; logística: rotas, sinalização e manutenção; gestão de infraestrutura de suporte: energia, água, saneamento e telecomunicações; suporte a projectos de engenharia.

Gardoll et al. (2000) afirmam que a habilidade para descrever formas características ou a geometria das estruturas geológicas nos depósitos minerais, que ajudam na exploração mineral, pode ser aprimorada num ambiente SIG onde há oportunidades sem igual, para desenvolver um conhecimento das características úteis na análise geológica.

Chica-Olmo et al. (2002) apontam o facto de que as técnicas de detecção remota e os SIG, aplicados conjuntamente numa exploração mineral no Sudeste de Espanha, produziram resultados que confirmam a utilidade desta aproximação metodológica, como ferramenta para aceder ao potencial mineral da região em estudo.

Todos estes exemplos ilustram a ampla gama de aplicações dos SIG, na área de gestão de recursos minerais, o que certamente permitirá as organizações que utilizarem estas ferramentas atingir níveis de competitividade muito elevados no mercado.

1.2- Objectivos

A abordagem desta temática pretenderá responder a um conjunto de questões e desafios e, ainda, contribuir para uma abordagem mais aprofundada, estruturada relativa às várias aplicações dos Sistemas de Informação Geográfica no sector mineral.

É evidente que, para que se alcance este objectivo genérico, deveremos prestar atenção a um conjunto de objectivos específicos, que nos conduzirão até ao preconizado. Assim, especificamente pretendemos:

- Criação de um sistema integrado e diversificado em que constem todas as variáveis relevantes para a investigação;
- Explicitar os principais benefícios da utilização dos SIG na Jamba, área específica do referido estudo;
- Analisar as várias correlações entre as variáveis em estudo e o produto final que será o mapa de aptidão mineral;
- Divulgar as vantagens da aquisição de dados digitais, para desenvolvimento do sector mineral no país e, nesse caso, a sua consequente utilização, para correcção de eventuais lacunas existentes.
- Disponibilizar em formato digital informação geológica, litológica, geomorfológica, geoquímica e de satélite para caracterização e conhecimento da área em estudo, que terá reflexos positivos na visualização da mesma.
- Apresentar a abordagem *data-driven*, mas precisamente o método dos pesos de evidência,
- Produzir um mapa de aptidão mineral do ferro para a região da Jamba em Angola

A utilidade dos SIG, a sua eficiência e eficácia, permitem oferecer subsídios de grande qualidade, constituindo-se como uma das contribuições mais interessantes na investigação concreta.

A aplicação de um SIG, para um estudo desta natureza, é, sem dúvida, muito proveitosa pelo que acreditamos que qualquer organização mineira recolherá grandes benefícios com a sua implementação, pois terá constantemente informação actualizada e útil para as mais diversas situações aplicações.

1.3- Metodologia

Este estudo, tal como outros desta natureza, baseia-se numa metodologia em que consiste primeiramente na revisão de literatura relevante para o seu desenvolvimento, onde procuramos sistematizar as várias contribuições de autores nas áreas de SIG e de outras afins. Segundo fez-se um diagnóstico restrito do sector mineral em Angola, para aferirmos as suas condições actuais e pretéritas. Terceiro foi realizada a recolha de dados relativos a área de estudo. Quarto, importamos para o nosso SIG todos aspectos importantes que confinariam na elaboração da base de dados e dos vários mapas.

1.4- Enquadramento Geográfico

A Jamba é uma comuna de Angola, que desde a década de 60 do século XX esteve virada para a produção de ferro e ouro devido à grande abundância dos seus jazigos metalíferos. Situa-se a 270 km para leste da cidade do Lubango (capital da província da Huíla). A região conta com uma área aproximada de 2798 Km² sendo a sua população essencialmente camponesa.

O rio Cunene e os seus afluentes constituem as principais linhas de água que, pela sua acção erosiva, põem a descoberto as rochas mais antigas.

O clima é, essencialmente, tropical húmido, com uma temperatura média anual de 25°C, sendo os meses de Junho, Julho e Agosto os mais frios. As chuvas são abundantes ultrapassando os 1000mm/ano, com maior incidência entre Outubro e Abril.

A região faz parte do planalto angolano. A sua altitude média é de 1400 metros diminuindo para oeste e sudoeste, com o ponto mais elevado situado em Tchamutete, elevação itabirítica (1528 metros). É possível encontrar nas vertentes destas elevações itabiríticas, depósitos formados pelo

escorregamento das rochas ferruginosas, posteriormente cimentadas, alternados por solos ferralíticos e argilosos avermelhados. Para além destes encontram-se granitos e pórfiros (variedade de rochas eruptivas), bem visíveis em zonas erodidas (Loureiro e Machado, 1972). Na figura 1, mais abaixo podemos observar a localização geográfica da comuna da Jamba, uma das comunas do interior de Angola.

Os primeiros estudos geológicos efectuados na região da Jamba incluíram as formações ferríferas no sistema Oendolongo. Os trabalhos realizados pela Companhia Mineira do Lobito, à qual foi concedida a área para pesquisa, prospecção e exploração na década de 60 do século XX, apontaram para o estabelecimento de três séries geológicas:

- A série Jamba, a mais antiga, com características vulcano-sedimentares, com formações itabiríticas;
- A série Cuandja, com sinais evidentes de metamorfismo, separada da anterior por nítida discordância;
- A série Bale, mais recente, não metamórfica e de composição essencialmente detrítica.

1.5- Estrutura da Dissertação

O presente trabalho está organizado em Cinco (5) capítulos, por formas a possibilitar a sua compreensão por parte do leitor.

Neste primeiro capítulo – Introdução – faz-se uma abordagem dos aspectos como enquadramento da temática em estudo, onde realiza-se a revisão de bibliografia, define-se os objectivos a atingir com o presente estudo, a metodologia a seguir na sua elaboração e enquadramento geográfico da área de estudo.

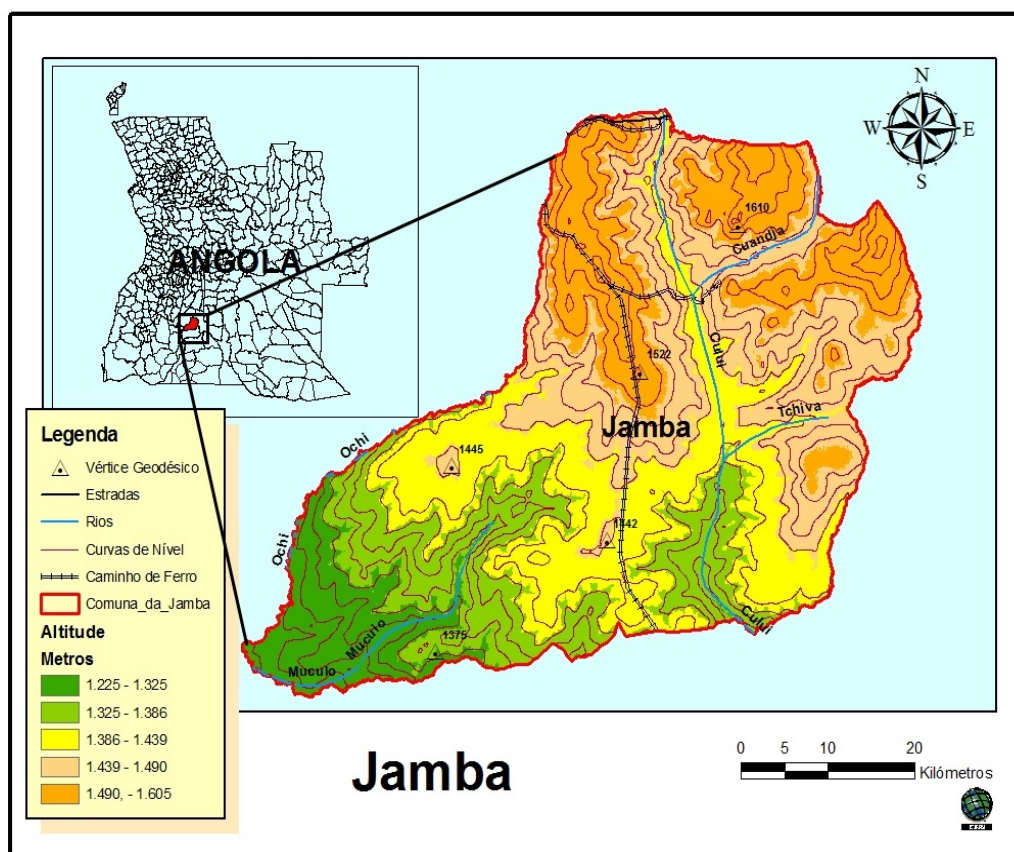


Figura 1. Localização da área de estudo.

No segundo capítulo sobre a exploração mineira, procura-se primeiro fazer-se uma abordagem geral sobre a exploração mineral, posteriormente contextualiza-se para a exploração mineral em Angola, na área de estudo e os principais métodos utilizados na pesquisa do mineiro de ferro.

No terceiro capítulo, os Sistemas de Informação Geográfica, abordamos aspectos relativos a algumas definições de SIG, evolução histórica, componentes de um SIG, introduzimos o aspecto Sistemas de Informação Geográfica aplicados ao sector mineral e apresentamos alguns exemplos de sucesso da utilização dos mesmos no sector.

No quarto capítulo faz-se uma descrição detalhada da integração dos dados espaciais e alfanuméricos em ambiente SIG para a determinação do

potencial mineral, gera-se o mapa de aptidão mineral, com recurso a metodologia dos pesos de evidência.

O quinto capítulo é dedicado ao resumo e às conclusões do trabalho, onde se analisam os resultados do estudo.

2- A EXPLORAÇÃO MINEIRA

2.1- Generalidades

Neste capítulo abordam-se os aspectos relacionados com a exploração mineral de uma forma geral, destacando-se a aplicação de métodos usados na pesquisa de minerais ferrosos. Aborda-se também a exploração mineira em Angola, trabalhos realizados pelos Serviços geológicos na promoção da cartografia geológica do território e, faz-se uma caracterização da região mineira da Jamba.

Desde que o género humano surgiu na Terra, tem ocorrido a ela para satisfazer as suas necessidades. A Terra tem sido o palco de muitos acontecimentos importantes, desde a descoberta do fogo até ao grande desenvolvimento da ciência e da técnica dos nossos dias. Podemos afirmar que para este desenvolvimento, devemos ter em conta a disponibilidade de recursos naturais do Planeta Terra, que suportaram e suportarão no futuro inúmeras actividades vitais.

O desenvolvimento alcançado pela civilização moderna tem imposto grande pressão sobre os recursos que o nosso planeta dispõe. A indústria humana precisa cada vez mais de matéria-prima, e a população em incessante crescimento consome produtos como nunca antes.

Para satisfazer as aspirações de ambos, há que necessariamente aumentar a disponibilidade de recursos naturais junto das grandes indústrias. A crescente procura de matérias-primas tem motivado a alta de preços no globo, a título de exemplo temos o preço de petróleo que atingiu, em 2008, valores inéditos, o que constituiu um grande obstáculo para as nações que dele dependem.

Numa economia liberal, largamente adoptada pelos vários países, a baixa ou alta dos preços depende sempre da relação oferta-procura, e os preços das matérias-primas minerais dependem da sua maior ou menor disponibilidade. Assim, para continuarmos a ter preços que sejam suportados pelos nossos

países, deveremos aumentar a quantidade de matérias-primas para o sector industrial.

O sector mineral, de grande importância para o desenvolvimento das várias nações do mundo, deverá contribuir cada vez mais com produtos para outros sectores, por formas a conseguir-se um equilíbrio que seja suportado por todos, quer sejam produtores, quer sejam consumidores.

A pesquisa, prospecção e exploração de novos jazigos minerais, é certamente uma alternativa, a ter em conta, para se conseguirem preços baixos. Na verdade, sempre foram realizadas essas actividades, mas hoje dispomos de uma tecnologia mais precisa e eficaz, que deve ser aproveitada para tal e, que certamente funciona como um efeito multiplicador dos resultados.

Temos assistido, desde o século XX, uma aposta crescente de instituições privadas, públicas e, mesmo académicas na descoberta e redescoberta de zonas de exploração mineral, um crescimento muito grande em projectos de cartografia geológica para apoio à exploração mineral e licenciamento de novas zonas de exploração.

O ferro, tal como outros minerais, provou ser de extrema importância para as várias actividades. Desde a Antiguidade que é usado para vários propósitos e, na verdade, esteve por trás do desenvolvimento de civilizações primitivas e não só. Foi amplamente utilizado na construção de armas, instrumentos de adorno e outros instrumentos de trabalho muito úteis.

O termo ferro provem do inglês arcaico *isern* e do alemão *isen(Eisen)*, e o Fe, é o símbolo derivado do latim *ferrum*. *Hematita* é o significado de *haimatites* em grego e, *magnetita* provém de *magneta* termo latino para rocha magnética (Christie e Brathwaite, 2006).

Os primeiros achados de instrumentos feitos de ferro datam de 6000 anos atrás e foram descobertos no Egipto, altura em que o mineral era considerado metal escasso e precioso, pois apenas a 3500 anos atrás é que

os povos do Médio Oriente e Sudeste da Europa descobriram que podiam produzi-lo a partir da fusão do minério em fornos a altas temperaturas (Christie e Brathwaite, 2006).

O primeiro ferro processado, provavelmente foi obtido fortuitamente durante a fundição de cobre. O Ferro era considerado como um metal escasso e precioso até aproximadamente 3400 anos atrás período em que as pessoas no Médio Oriente e Sudeste a Europa, descobriram que podiam produzir ferro forjado aquecendo massa de minério de ferro e carvão em um forno. O processo foi depois melhorado.

A técnica para adquirir ferro fundido foi desenvolvida primeiro pelos *Hittites* da Anatólia (actual Turquia) e eles conseguiram manter este segredo por quase 200 anos período as conquistas prósperas deles sobre outros povos com armas inferiores.

O reconhecimento das qualidades superiores do ferro na produção de instrumentos e armas conduziram a mudanças na indústria metalúrgica, pois o ferro foi substituindo em grande parte o bronze em vários usos, e enquanto isso foi marcando a transição da Idade do Bronze para a Idade Ferro.

As características desde mineral como a dureza e a sua ampla utilização pelo homem, que tornaram o mesmo substituto das ligas de Bronze fizeram surgir, a aproximadamente 2600 Anos atrás, na China o que se convencionou chamar por Idade do Ferro.

Aproximadamente 2000 anos atrás, ferreiros aprenderam fazer aço aquecendo ferro e carvão mineral por um período de vários dias. O aço funcionou como uma mola impulsora para o desenvolvimento industrial da Grã-Bretanha e dos EUA, desde o século XIX.

2.2- A Exploração Mineira em Angola

Os minerais são parte importante na balança comercial de Angola, pois o país ainda tem uma dependência muito grande deste tipo de recursos naturais, que exporta para os países que experimentam um crescimento

industrial incessante. Os principais mineiros que historicamente têm sido extraídos do subsolo de Angola são o petróleo, diamantes, ferro, manganês, ouro, cobre, substâncias betuminosas, gesso, caulino, granito, mármore, etc.

No período compreendido entre 1963 e 1972 houve um crescimento anual de cerca de 22% da produção mineral no país e, em 1973, o crescimento foi de 32,8%, com relação ao ano anterior. Neste ano, apenas seis (6) companhias mineiras e três (3) produtos (petróleo, ferro e diamantes), contribuíram com mais de 99,3%, no total da produção, do sector mineiro de Angola (Banco de Angola, 1973). Na tabela 1 é possível ter-se uma ideia do volume de produção mineira para tal período.

Minério	Unidades	Quantidade produzida em 1964	Quantidade produzida em 1966	Quantidade produzida em 1968	Quantidade produzida em 1970	Quantidade produzida em 1972	Quantidade produzida em 1973
Diamantes	Quilates	1 146 068	1 268 140	1 667 187	2 395 552	2 155 057	2 124 720
Ferro	Toneladas	899 389	790 548	3 218 212	6 051 865	4 830 957	6 052 194
Petróleo	Toneladas	904 757	631 319	749 514	5 065 105	7 057 253	8 175 201

Tabela 1. Os três principais produtos de exportação entre (1964-1973):Fonte Banco de Angola 1973

Devido a constrangimentos de ordem política e social, depois de 1975, a produção mineira experimentou um grande declínio, tendo sido praticamente paralisada, com excepção do petróleo e dos diamantes, que mesmo depois de 1975 receberam grandes investimentos. Recentemente as rochas ornamentais como o granito e mármore voltaram a ser exploradas e, há um grupo de empresas com projectos praticamente concluídos para exploração de minerais metálicos em várias regiões de Angola.

O Ministério da Geologia e Minas de Angola possui variadas atribuições, como licenciamento, controlo e disciplina da actividade mineira, o estudo sistemático de geologia do território e a elaboração da respectiva cartografia geológica.

Já no período colonial, vários estudos foram desenvolvidos pelos Serviços de Geologia e Minas de Angola e, por outros parceiros, estudos geológicos que conduziram ao conhecimento de algumas áreas do país.

De 1960 a 1969 os Serviços de Geologia e Minas promoveram a execução da cartografia geológica de cerca de 150 400 km², dos quais mais de 46% por intermédio do seu pessoal (Neto, 1969).

As preocupações pelo conhecimento das características geológicas de Angola não são recentes, podendo apontar-se trabalhos como:

A primeira carta magnética para o território de Angola, que foi compilada no século XIX, como resultado de duas expedições realizadas pelos exploradores Capello e Ivens, detentores de grandes conhecimentos científicos, e na altura ao serviço do exército português entre 1877-1879 e 1884-1885, estas expedições cobriram vários territórios de Angola, Congo Democrático, Zâmbia, Zimbabwe e Moçambique (Vaquero e Trigo, 2006).

O Mapa geológico, na escala 1:500 000, levantado por Beetz, que trabalhou em 1932 no Sudoeste de Angola por conta da Companhia dos Diamantes, trabalho que tinha certamente preocupações de ordem mineira.

O esboço geológico de Angola, na escala de 1:2000 000, coordenado por Mouta e publicado em 1954, apoiado no trabalho anterior. Este foi certamente um dos trabalhos mais importantes na área.

A Carta dos recursos minerais de Angola a escala de 1:1000 000, publicada em 1998, pelo Instituto Geológico de Angola, instituição afectada ao Ministério da Geologia e Minas.

O mapa dos recursos minerais de Angola, também na escala de 1:1000 000, desenvolvido em ambiente SIG, utilizando o *Arc Info 8.3*, feito e publicado pelo Departamento de Cartografia Geológica do Instituto Geológico da Polónia em 2004, que é possível observar mais abaixo na figura 2.

A Carta geológica e dos maiores depósitos minerais da África Central na escala de 1:4000000 incluindo Angola, Camarões, Guiné Equatorial, Republica Centro Africana, Republica do Congo, Republica Democrática do Congo, Tchad e Zâmbia elaborada pelo IGCP (*International Geoscience Programme*) e pelo BRGM (*Bureau de Recherches Géologiques et Minières*), apresentada em 2004 no vigésimo colóquio de geologia africana, realizado nos EUA.

Outros estudos foram feitos para a caracterização e compilação das características geológico-mineiras de Angola, algumas vezes por organismos do estado e outras por empresas do sector privado.

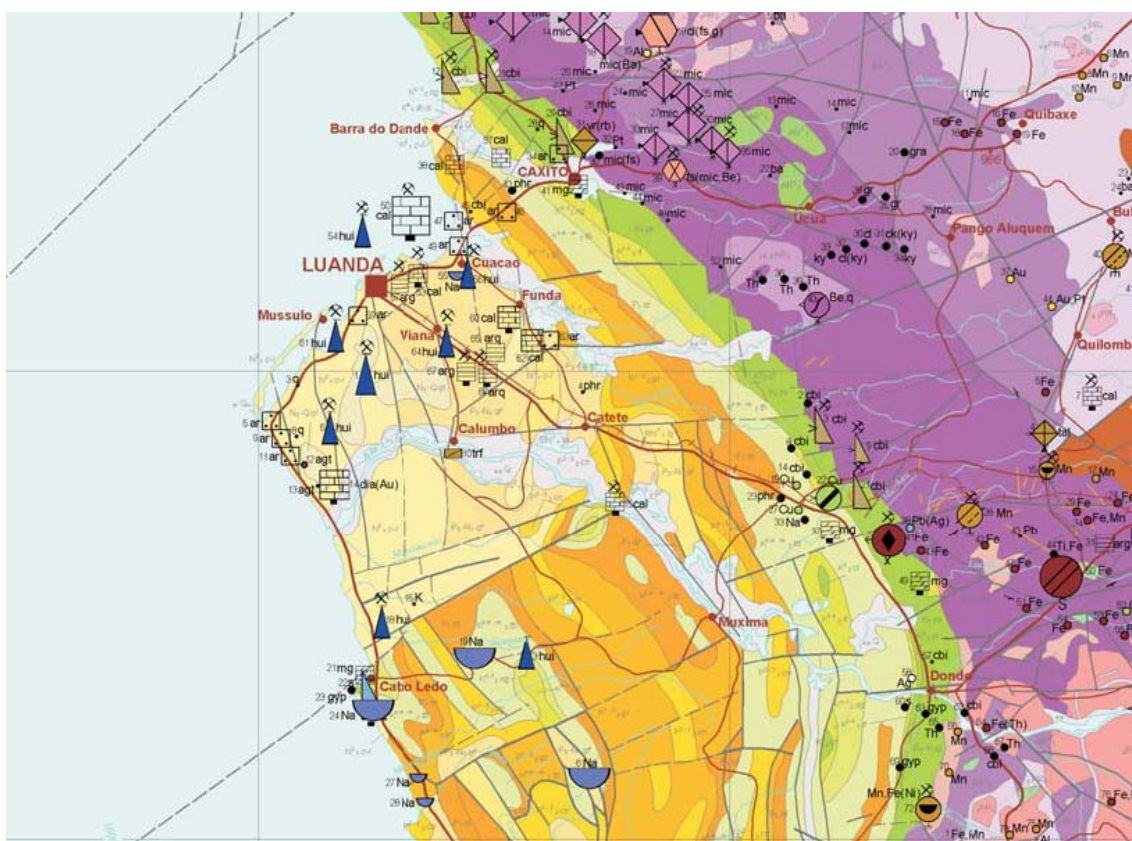


Figura 2. Extracto da carta dos recursos minerais de Angola. Fonte: Departamento de Cartografia Geológica do Instituto Geológico da Polónia em 2004.

2.3- A Exploração do Minério de Ferro em Angola

A existência de jazigos de minérios de Ferro em Angola e o seu aproveitamento para o fabrico de armas e ferramentas já era uma realidade nas mais antigas tradições das tribos angolanas, principalmente do Planalto Central.

De acordo com Nunes (1991), o Governador António de Vasconcelos, já em 1758, empenhou-se na exploração dos jazigos de minério de ferro do Golungo Alto, Ambaca e Caconda, tendo comunicado a Lisboa a existência destes depósitos e solicitado meios humanos e financeiros para a sua posterior exploração e tratamento metalúrgico.

A autorização do governo de Lisboa para o lançamento do projecto foi comunicada por ofício de 22 de Julho de 1766 (Idem).

As actividades siderúrgicas, já a nível industrial, foram iniciadas em Angola em 1776, com as instalações de Nova Oeiras, que utilizava, essencialmente, o minério de M'Bassa (Gouveia et al., 1993). A seguir temos algumas características dos principais jazigos de ferro de Angola.

a) Jazigo de M'Bassa

Situa-se a 15 Km para Sudeste da vila de Zenza do Itombe. Coordenadas centrais, 9°21'17"S; 14°21'59"E. O jazigo ocupa uma área de aproximadamente 400 hectares. O relevo tem a configuração de morros (designados como Sequela, Sambanguila e Grundler). Os minerais metálicos são a magnetite, hematite, ilmenite e hidróxidos de ferro. Os minérios são fortemente magnéticos de alta qualidade, contendo 52%-62% de ferro.

b) Jazigo de Cassala-Quitungo

Situa-se a 30 Km para Sudoeste da cidade de N'dalatando. Coordenadas centrais, 9°27'02"S; 14°42'40"E. O jazigo integra várias áreas que anteriormente eram consideradas como jazigos independentes, tendo depois sido agrupados, ocupando uma zona mineira com mais de 15km de

extensão e 1-2 km de largura. Os minerais metálicos são hematite e magnetite. O teor de ferro é de 30% em Quitungo e 33,5% em Cassala.

c) Jazigo de Tumbi

Situa-se a 25 Km para Sudeste da cidade de N'dalatando e a 17 Km a Sul do caminho-de-ferro de Luanda. Coordenadas centrais 9°27'15"S; 15°05'19"E. As dimensões são de várias dezenas e centenas de metros em extensão e em profundidade, não existindo contudo dados rigorosos. Minerais metálicos, hematite e magnetite. Os minérios são de boa qualidade com teor em ferro de 65%.

d) Jazigo de Essala

Situa-se a 21 Km para Sudoeste da povoação de Andulo. Coordenadas centrais 11°40'S; 16°35'40" E. Minerais metálicos, magnetite, hematite e óxidos de ferro. O teor médio de ferro neste jazigo é de 64% e, em algumas áreas o teor de óxido de ferro atinge 89,92%.

e) Jazigo do Bailundo

Situa-se a 80 Km para Nordeste da cidade do Huambo. Coordenadas centrais 12°09'S; 15°57'E. Ocupa uma área aproximada de 15km². O principal mineral metálico é magnetite. A principal substância útil é o ferro com teor médio de 60%.

Existem ainda outras ocorrências, que devido ao seu reduzido valor económico, não foram objecto de estudos detalhados, tais como: Kissama, Andulo-Chillesso, Cuima, Gambos, Curoca, Chitado, Alto Zambeze, e outros (Gouveia et al., 1992; Araújo et al., 2001). Na figura 3 a seguir temos a localização dos principais jazigos de ferro conhecidos em Angola.

A zona mineira da Jamba, por ser objecto do presente estudo, será caracterizada mais adiante.

Localização dos principais Jazigos de Ferro

Legenda

- ▲ FERRO
- capital_provincia
- estrada_nacional
- Rios
- caminho_de_ferro

Geologia_Eras

ERA S

- ARCAICO-INFERIOR
- ARCAICO-SUPERIOR
- CENOZOICO
- MESOZOICO
- PROTEROZOICO-INFERIOR
- PROTEROZOICO-SUPERIOR

0 85 170 340 Quilómetros

18

2.4- O Ferro de Cassinga – Jamba

Data de 1908, o conhecimento da existência de minérios de ferro na região de Cassinga - Jamba. Nesta região predominam as rochas do complexo de Base, representado por granitos e por gnaisses, a que se associam xistos e quartzitos Pré-câmbrios.

Em 29 de Abril de 1929, foi fundada a Companhia Mineira do Lobito, por iniciativa do cidadão português João de Sousa Machado. Anos depois foi concedida a esta companhia ao abrigo do artigo 19, do decreto de 20 de Setembro de 1906 (Lei de Minas do Ultramar), uma extensa área exclusiva de pesquisas mineiras no Centro e Sul de Angola. Esta concessão foi concretizada pelo decreto 37.677, de 22 de Dezembro de 1949, promulgado pelo capitão Teófilo Duarte.

Em 1953, a Sociedade Mineira do Lobito obteve um exclusivo de pesquisa e exploração mineira, numa área de 55.000 km², que engloba a região de Cassinga. (Neto, 1969).

A partir de 1958 aquela sociedade iniciou estudos e trabalhos mineiros com vista ao conhecimento das ocorrências de mineiros de ferro. A partir desses estudos que ainda perseguem, nesta data, foi possível seleccionar duas áreas de mineiros de ferro “zona sul de Cassinga” e “zona norte de Cassinga”.

Em cada uma das áreas foram assinalados diversos jazigos de mineiros de ferro, de grande interesse nos quais predomina a hematite.

Desde princípios dos anos 50 até 1974, por decisão da Companhia Mineira do Lobito, desenvolveram-se vários programas de pesquisa com a realização de trabalhos de cartografia, geologia estrutural, geofísica, geoquímica, petrografia e geocronologia. Actualmente, estes estudos são realizados pela Ferrangol (Empresa Nacional de Ferro de Angola), empresa do Estado angolano que é proprietária das licenças de exploração de Ferro, nos jazigos de Cassala-Quitungo (Kuanza-Norte) e Cassinga (Huíla).

2.4.1- Geologia da Jamba

A zona mineira da Jamba ocupa uma posição central e meridional na vastidão do planalto angolano.

A altitude média desta área varia entre 1000 e 1500m, podendo localmente atingir os 2000m.

A vegetação é do tipo savana arbustiva com árvores, a topografia é de certo modo monótona, com interrupções esporádicas de montículos graníticos ou de rochas quartzíticas e vulcânicas. Para Sul e para Sudeste a altitude vai progressivamente baixando em direcção à bacia do Kalahari (Ferrangol, 1997).

A região é servida por um caminho-de-ferro que a liga ao porto do Namibe e que foi especialmente construído para o transporte do minério de ferro. No Namibe foram, para o mesmo efeito, preparados dispositivos próprios de um porto mineiro. A distância do Namibe às áreas de Cassinga Norte (Jamba) e Cassinga Sul é respectivamente de 555 km e 611 km. As ocorrências de minérios de ferro distribuem-se ao longo de uma faixa de 100 km, orientada segundo o rumo noroeste-sudeste.

Os geólogos conferiram particular atenção ao grupo da Jamba, onde as rochas mais importantes são os xistos, grauvaques, rochas ferruginosas jaspilíticas, rochas vulcânicas básicas, rochas vulcânicas intermédias e ácidas associadas aos itabirítos.

O grupo da Jamba apresenta-se na forma de manchas isoladas, correspondendo a mega estruturas sinclinais orientadas a volta do rumo norte-sul. Na figura 4 que se vê mais abaixo, estão presentes as características geológicas da Jamba. Onde até à data conhecem-se os seguintes Jazigos com reservas bastante interessantes: Jamba, Cateruca, Issaca, Mavulo e Indungo (Araújo, et al 2001).

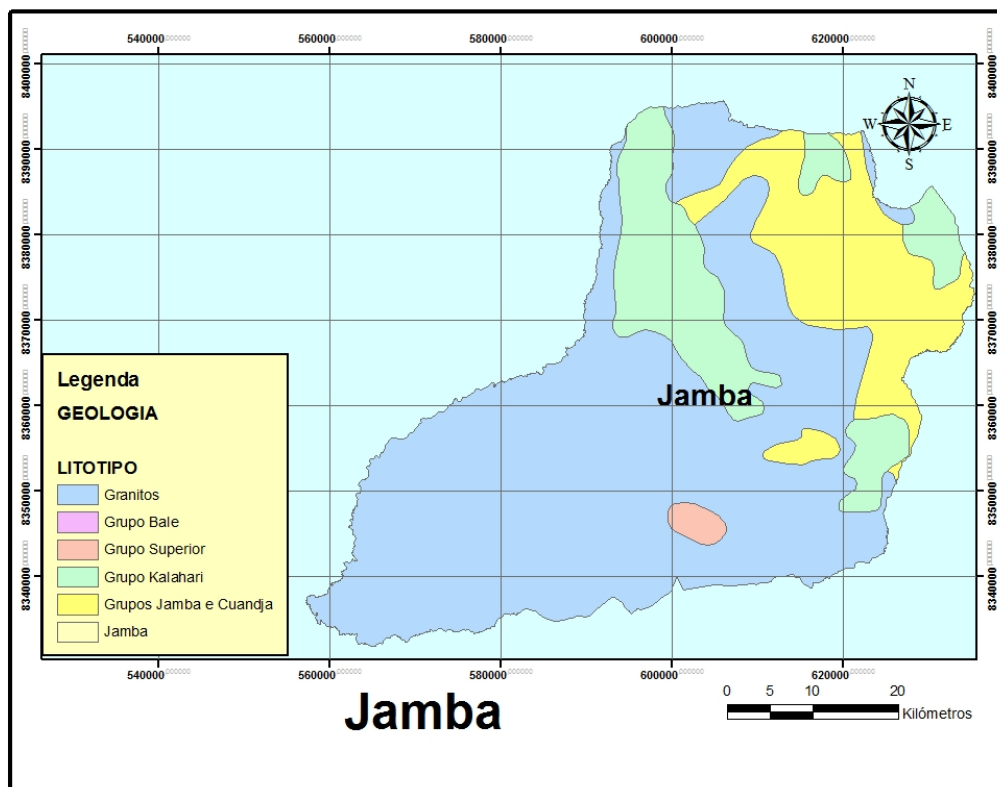


Figura 4. Esboço geológico da comuna da Jamba Fonte: Adaptado de Araújo et al 2001.

A génese dos jazigos de ferro nesta região de Angola relaciona-se com fenómenos de alteração e de redistribuição da hematite das rochas itabiríticas, das quais resultou um enriquecimento em minério de ferro. Conhecem-se jazigos deste tipo em Cassinga Sul, tais como os de Tchamutete, Campulo, Matote, Baca-la-Mitcha, Jimbo, Cachibamba e Mutango- Capungo.

Analisando o mapa estratigráfico, da região de estudo pode-se verificar que, o mineiro aflora em regiões com idades muito antigas, regiões constituídas principalmente rochas do proterozóico inferior, como podemos verificar na figura 5. Estas rochas são importantes na localização de itabirítos, pois foi neste período que se formaram os depósitos mais significativos destes minérios (Basílio, 2005).

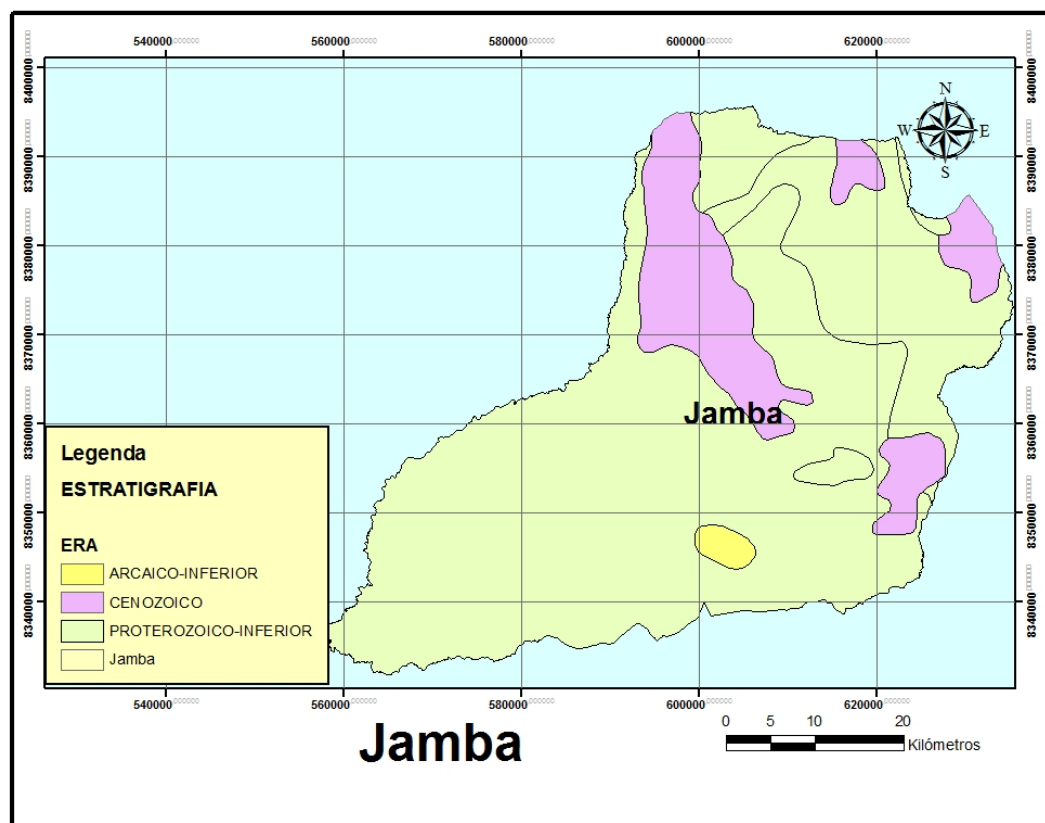


Figura 5. Esboço estratigráfico da Jamba. Fonte: Adaptado de Araújo et al 2001.

2.5- Tipos de jazigos de Ferro

Quanto à sua génese, James (1966), citado por Basílio, 2005), classifica os jazigos de ferro agrupados em quatro tipos principais, jazigos de depósitos formados por actividade magmática, jazigos de depósitos formados por soluções hidrotermais, jazigos de depósitos resultantes de alterações e acumulo em superfície e jazigos de depósitos sedimentares bandados ou acamados.

a) Jazigos formados por actividade magmática

Durante a cristalização das rochas magmáticas, pode ocorrer um processo de concentração de ferro. Este processo resulta no surgimento de depósitos em concentração económica quando o ferro está presente na fase fluida que escapa para as rochas vizinhas a partir de um magma activo (Basílio, 2005). Estas concentrações de ferro, em calcários, são importantes mineiros em

regiões dos EUA, Rússia e Japão. Outra possibilidade ocorre quando há enriquecimento de ferro em rochas ígneas durante a cristalização.

b) Jazigos formados por soluções hidrotermais

São formados quando fluidos finais da cristalização magmática interagem com rochas vizinhas. Os fluidos podem enriquecer rochas não ferruginosas ou rochas já ferruginosas. São exemplo os jazigos de ferro no Ocidente dos EUA (Basílio, 2005).

c) Jazigos resultantes de alterações e acúmulos em superfície

Ocorrem quando há enriquecimento das camadas superficiais ou subsuperficiais, costumam ser divididos em dois grupos; os depósitos de laterites onde predomina a limonite, representando o produto de alteração em climas tropicais húmidos, e depósitos de enriquecimento residual de baixa concentração de ferro, resultantes de processos de oxidação e lixiviação da sílica.

d) Jazigos de depósitos sedimentares acamados ou bandados

Estes são seguramente os jazigos de ferro mais abundantes no nosso planeta, sendo encontrados em todos continentes. Apesar de serem muito abundantes, a sua origem continua a ser ainda muito controversa (Rao e Naqvi, 1995; Webb, et al, 2003; Kappler, et al, 2005).

Estes depósitos de ferro têm sido denominados na literatura geológica, como itabirítos, taconitos ou BIF que em inglês significa *Banded Iron Formation*.

São rochas de origem sedimentar constituídas de bandas alternadas de minerais silíceos e de minerais ferruginosos que tomaram o seu nome do monte Itabira, em Minas Gerais no Brasil (Gouveia e outros, 1993).

As reservas de itabirítos na Jamba são bastante avultadas, perfazendo centenas de milhões de toneladas, talvez mesmo 1,5 biliões de toneladas de material com 25 - 40% de ferro.

Até à suspensão das actividades da Companhia Mineira do Lobito, em 1974, foram executados numerosos estudos sobre problemas relacionados com o aproveitamento dos itabirítos.

Os trabalhos de exploração iniciados na Jamba (Cassinga Norte) em 1967, aproveitaram a fácil recolha de material eluvionar. Assim, a lavaria da Jamba produziu em 1969 um volume de concentrados correspondentes a 4,2 milhões de toneladas. Nesse mesmo ano foi implantado em Tchamutete (Cassinga Sul) um outro centro mineiro.

Considerações baseadas na técnica tradicional de avaliação de jazigos, que passam pelo conhecimento das áreas de afloramento, conduzem à sólida convicção de estarmos em presença de recursos minérios superiores a 4,2 gigatoneladas (Ferrangol, 1997).

2.6 - Métodos Geofísicos

A Geofísica é a aplicação dos princípios da física no estudo da Terra. Os seus objectivos são a detecção e localização de estruturas geológicas no solo e subsolo, a determinação da sua geometria e dimensões (Dohr, 1974; Parasnis, 1997; Mussett e Khan, 2000).

O número de aspectos geológicos considerados no contexto ambiental é variado, implicando a utilização de diferentes métodos de prospecção geofísica, tais como: Método Gravimétrico, Magnético, Eléctrico, Electromagnético, Sísmico, Radiométrico e *Ground Penetrating Radar (GPR)*.

A eleição de um método em pesquisa mineral depende grandemente do tipo de minério a pesquisar, sendo, para o caso do ferro, muito comum o uso do método magnético, quer seja com ajuda de avião, neste caso aeromagnético, quer seja com auxílio magnetómetros terrestres ou, ainda, por satélites.

2.6.1- Método Magnético

Já na idade média os Suecos usaram bússolas e agulhas magnéticas para encontrar depósitos de magnetite, tornando o método magnético no mais antigo de todos, no grupo dos métodos geofísicos (Milson, 2003).

Hoje, continua ainda sendo um dos métodos mais utilizados, devidas as características magnéticas de alguns minerais.

A Terra possui um campo magnético originado por forças no seu núcleo. A intensidade do campo magnético terrestre é geralmente expressa no sistema Internacional em *nanoTeslas* (nT), ou na antiga unidade, o *gamma* (γ), em que: $1(\gamma)=1nT=10^{-3}\mu T$.

Muitas rochas e minerais são magnéticas ou são magnetizadas por indução do campo terrestre e causam perturbações espaciais ou anomalias no campo.

As anomalias magnéticas são originadas por rochas que contêm enormes quantidades de minerais magnéticos, sendo o mais comum a magnetite. As anomalias reflectem variações na quantidade, no tipo de material magnético, na forma e profundidade dos mesmos (Bankey e Pitkin, 2000).

Como as anomalias magnéticas crescem rapidamente com o aumento do conteúdo de magnetite, as ocorrências de ferro são mais favoráveis à pesquisa por magnetometria. O teor de magnetite das rochas explica grandemente a intensidade das anomalias magnéticas.

O método magnético é um dos métodos com mais sucesso para a localização de corpos metálicos (Watson, et al, 2001; El-Sadek, 2009).

Os mapas de anomalias magnéticas são ferramentas importantes no mapeamento de rochas superficiais e subterrâneas, processos hidrotermais e outros, sendo muito utilizados na localização de intrusões ígneas que podem estar relacionadas com prováveis depósitos minerais.

A susceptibilidade magnética de uma rocha depende geralmente do seu conteúdo em magnetite. As rochas sedimentares e as rochas ígneas ácidas apresentam reduzida susceptibilidade, por outro lado, os basaltos, doleritos,

gabros, serpentinas, possuem regra geral elevado magnetismo (Milson, 2003).

Na tabela 2 apresenta-se a susceptibilidade magnética de algumas rochas e minerais.

Rochas	Susceptibilidade
Ardósia	0-0,002
Dolerito	0,01-0,15
Basalto	0,001-0,1
Granulite	0,0001-0,05
Riolitos	0,00025-0,01
Sal gema	0-0,001
Gabro	0,001-0,1
Calcário	0,00001-0,0001
Minerais	
Hematite	0,001-0,0001
Magnetite	0,1-2,0
Cromite	0,0075-1,5
Pirotite	0,001-1,0
Pirite	0,0001-0,005

Tabela 2. Susceptibilidade de algumas rochas e minerais Fonte: Milson, 2003.

Desde finais da década de 60 a detecção remota passou a fazer parte das áreas científicas, com interesse na prospecção geofísica da nossa litosfera, tendo sido iniciados vários programas aeroespaciais.

O primeiro mapa de anomalias magnéticas, resultante de detecção remota por satélite, foi produzido a partir dos dados do satélite *POGO*, da *NASA* nas décadas de 60 e 70. Entre 1979-1980, com o satélite *MAGSAT*, também da *NASA*, foi possível representar com maior qualidade as anomalias magnéticas, devido à sua capacidade de elaborar vectores (Ravat, e tal, 1995). Em 1999, o satélite dinamarquês *ORSTED*, é lançado e as suas medições magnéticas de grande precisão foram usadas na construção do

modelo IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*). No ano 2000, foi lançado o satélite alemão CHAMP, que tem servido para gerar um modelo preciso do campo magnético terrestre, o MF6 (*Sixth Generation Lithospheric Magnetic Field Model*) com varias aplicações em geologia, tais como na determinação da estrutura do fundo do oceano (Maus, et al, 2008).

A interpretação das medições do campo magnético terrestre, obtida a partir de satélites, tornou possível o conhecimento de muitos aspectos do nosso Planeta.

A bibliografia existente, relacionada com o assunto, expressa que as anomalias geralmente indicam as fontes posicionadas no subsolo, com grande concentração de minerais magnéticos (Mayhew, et al, 1985, Langel, 1990, Ravat, et al, 1993), citados por (Kis e Wittmann, 1997).

De forma sintética os principais objectivos destes programas são:

- Desenvolvimento de conhecimentos correctos sobre o campo magnético terrestre;
- Obtenção de dados para actualização e refinamento de modelos globais e regionais existentes;
- Compilação de um mapa global de anomalias magnéticas da crosta terrestre para interpretação posterior de modelos geológicos e geofísicos da terra.

Estes satélites têm fornecido medidas magnéticas de grande utilidade a escala global e regional mas, não possuem resolução adequada para muitos estudos de pesquisa mineral locais, pelo que a utilização de magnetómetros terrestres ou implantados em aviões é ainda a melhor opção. Esperamos que no futuro possamos ter uma resolução melhor, devido o alto custo dos serviços actuais.

A aplicação dos métodos geofísicos na pesquisa mineral tem-se mostrado importante na descoberta e confirmação de jazigos para exploração.

A interpretação de dados geofísicos e de imagens de satélite são fontes valiosas, para a melhoria dos procedimentos metodológicos voltados para a pesquisa mineral (Tarso, et al, 2006). Assim, nos estudos geológicos deve

dar-se grande ênfase aos métodos geofísicos para resolver as ambiguidades e melhorar a identificação dos jazigos minerais.

Os levantamentos geofísicos contribuíram para traçar os contornos das ocorrências de ferro em tempo muito mais curto do que seria necessário se fosse usado qualquer outro método de pesquisa (Davino, 1974; El-Sadek, 2009). A aplicação do método magnético na pesquisa de jazigos de ferro é clássica e considera-se necessária antes da programação de outros métodos de prospecção.

2.7 – Método Geoquímico

A Geoquímica estuda da distribuição dos elementos químicos na Terra. A Geoquímica contemporânea teve o seu início no século XX, mas os seus fundamentos são muito antigos, tendo seguramente beneficiado do contributo da Mineralogia e da Química.

Os primeiros estudos mineralógicos e geoquímicos conhecidos remontam a Teofrásto (371-286 AC), que organizou a primeira lista de minerais conhecidos na época. Giórgio Agrícola (1490-1555) lançou as bases para a compreensão mais profunda dos objectivos da Mineralogia e da Geoquímica (Popp, 1998).

O termo geoquímica foi empregue pela primeira vez pelo químico suíço C.F.Schonbein em 1838, referindo-se à necessidade de maior atenção à natureza dos elementos químicos na terra (McSween, et al, 2003).

A distribuição dos elementos químicos no planeta está condicionada aos processos geoquímicos de migração, dispersão e redistribuição dos elementos, seja em ambiente profundo ou superficial (Licht, 2001).

A Geoquímica utiliza os princípios da Química para explicar os mecanismos reguladores da actividade pretérita e actual dos principais sistemas geológicos como, o manto, crosta terrestre, oceanos e atmosfera (Albaréde, 2003).

A Geoquímica é a ciência que fornece ao geólogo os princípios para analisar os elementos químicos e a sua distribuição a superfície terrestre, o que torna

possível a compreensão de muitos processos terrestres e planetários, como a formação das rochas, a origem dos minerais e outros (idem...).

A distribuição dos elementos químicos no Planeta e a sua abundância média é conhecida tendo os dez elementos mais abundantes um peso muito significativo no total geral. A unidade utilizada para expressar a abundância média dos elementos químicos é a unidade *Clarke*, proposta pelo geoquímico russo A.E.Fersman (1883-1945) em homenagem ao cientista americano F.W.Clarke (1847-1934).

Na tabela 3 que é apresentada a seguir temos a abundância dos dez principais elementos químicos da Terra.

Elemento	Símbolo	Clarke
Oxigénio	O	466000
Silício	Si	277000
Alumínio	Al	83600
Ferro	Fe	62200
Cálcio	Ca	46600
Magnésio	Mg	27640
Sódio	Na	22700
Potássio	K	18400
Titânio	Ti	6320
Fósforo	P	1120

Tabela 3. Valores dos índices de Clarke dos dez principais elementos químicos do Planeta Fonte: Licht, 2001.

A prospecção geoquímica baseia-se na medição sistemática das propriedades químicas de um material que ocorre naturalmente e, visa encontrar substâncias minerais úteis, em condições que permitem a sua extracção lucrativa.

A geoquímica é um componente essencial dos mais modernos programas, integrados de exploração mineral, constituindo 10-25% dos orçamentos na exploração mineral (Closs, 1997).

A presença de um jazigo metálico determina, localmente, um acréscimo notável do teor do metal considerado, constituindo uma anomalia

geoquímica. Segundo (Closs, 1997) anomalia geoquímica é a área onde as propriedades químicas de um material que ocorra naturalmente, indicam a presença de um jazigo mineral na vizinhança.

As técnicas de prospecção geoquímica aplicadas a prospecção mineira têm por base, a detecção e interpretação de anomalias químicas numa grande variedade de materiais naturais, tais como, rochas, solos, vegetação, água e depósitos aluvionares, podendo-se mesmo afirmar que a descoberta, avaliação, exploração e desenvolvimento dos jazigos depende em grande medida dos métodos e análises geoquímicas dos constituintes da crosta terrestre.

Os dados resultantes das análises podem ser usados para mostrar a distribuição e concentração total dos elementos com ajuda de meios tecnológicos, como os SIG, permitindo a redução de custos, o refinamento dos modelos minerais e conceptuais, análise de dados baseada nos computadores, que melhoram as técnicas de visualização, desenvolvimento de soluções de maior capacidade analítica permitindo a avaliação mais completa dos dados (Closs, 1997; Jordan, et al, 2007).

O conhecimento da composição química da região mineira é fulcral para a eficiência e manutenção da actividade mineira em si, bem como para o seu mapeamento e classificação (Albarède, 2003).

Os mapas geoquímicos, particularmente aqueles preparados tendo em conta padrões modernos, têm sido muito utilizados na identificação e prospecção de depósitos de minerais metálicos (Jordan, et al, 2007).

Pode-se concluir que a exploração do minério de ferro no mundo não é uma actividade recente, e a utilidade deste mineral para a Humanidade é notória. Em Angola o exercício de exploração começa no século XX, durante a administração colonial e, é nesta fase que se começa a elaborar a cartografia geológica de Angola. Hoje ainda não se conhece de forma cabal o potencial mineral do país, pelo que há uma grande necessidade de se conseguir esse conhecimento. Os métodos de exploração mineral em combinação com os SIG são uma excelente alternativa para o conhecimento geológico de Angola.

3- OS SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

Neste capítulo faz-se uma abordagem dos SIG de forma geral, onde são apresentadas as suas principais contribuições para a sociedade de uma forma geral, aborda-se sua evolução histórica onde são conhecidos os períodos mais importantes na trajetória destes sistemas. As componentes dos SIG são também vistas neste capítulo onde fazemos uma abordagem das mesmas. Finalmente fala-se da utilização dos SIG na pesquisa mineral, realçando o seu contributo para este sector importante. Apresenta-se um modelo de exploração mineral em SIG e suas componentes e, finalmente alguns exemplos de utilização dos SIG no sector.

O conhecimento sobre a organização do espaço é um subsídio grandioso, para o progresso social, o que tem impelido as sociedades na busca deste conhecimento importante. Assim, são afortunadas as nações que possuem conhecimento sobre o espaço para melhorar a gestão dos seus recursos.

A organização espacial em termos científicos é relativamente recente, mas de facto ela sempre fez parte de todas sociedades, desde as mais primitivas, para trabalhar, guerrear, navegar, conquistar, etc.

Os desenvolvimentos no sector das novas tecnologias têm permitido uma maior adequação nos métodos de obtenção de informação e de gestão integrada do espaço.

Os utilizadores das tecnologias de informação geográfica possuem uma necessidade e crescente por dados geográficos em diversos formatos para realizar mapeamentos de áreas de interesse, com intuito de gerar análises, comparações ou outros procedimentos para gestão do espaço.

O início da era espacial trouxe certamente uma grande quantidade de dados e informação sobre a superfície terrestre que resultou num conhecimento melhor das regiões do nosso planeta, porque tal conhecimento passou a estar disponível, até para as regiões mais inóspitas e inacessíveis. Devemos aqui destacar os programas espaciais da América do Norte, da Europa e de

algumas nações asiáticas que muito têm contribuído para um conhecimento mais pormenorizado da Terra.

Os SIG e a detecção remota constituem os campos científicos e tecnológicos, que principalmente trabalham com informação sobre o espaço, para solucionarem os problemas quotidianos do género humano, no que concerne a gestão sustentável dos recursos do planeta.

O uso sustentável dos recursos naturais, depende cada vez mais da utilização de informação e modelos com uma componente integradora e multidisciplinar, pois a complexidade crescente das nossas actividades, torna necessárias análises cada vez mais precisas e rápidas, o que certamente é conseguido com os Sistemas de Informação Geográfica.

Os SIG apresentam-se como uma opção aos métodos tradicionais de planificação, pois é uma ferramenta poderosa, integrando dados espaciais e os seus atributos possibilitando a simulação e a visualização de informações associadas aos mapas dos mais diversos sectores e fornecendo subsídios ao processo de tomada de decisões.

As vantagens dos SIG mostram que estes sistemas têm um enorme potencial de utilização, pois agilizam e modernizam completamente os sistemas de controlo de informação existentes. Em associação com outros dispositivos como o GPS, que efectua a captura e edição de dados, torna a planificação ainda mais eficiente, pois o acesso a informações espaciais actualizadas é um dos pontos críticos em muitos sectores-chave para o desenvolvimento da nossa sociedade. Outro aspecto importante é a possibilidade de configuração conforme as necessidades da instituição, o que faz com que o seu potencial como ferramenta seja melhor explorado.

Estes sistemas possibilitam a integração, numa única base de dados, de informações geográficas, proveniente de fontes diversas, tais como dados cartográficos, dados de censos, cadastro urbano e rural, imagens de satélite e modelos digitais de terreno. Os SIG oferecem mecanismos para recuperar,

visualizar e manipular estes dados, através de algoritmos de manipulação e análise.

Um modelo pode ser considerado como uma tentativa de definir e representar numa aproximação sistémica integradora um fenómeno ou conjunto de fenómenos.

O modelo promove uma utilização de símbolos organizada, uma formalização do conhecimento baseada numa linguagem de representação.

A integração de modelos espaciais em SIG tem elevado potencial para a resolução de problemas espaciais, examinando-os com mais detalhe e servindo como catalizadores para a descoberta de soluções inovadoras.

Podemos então dizer que os sistemas de informação geográfica são instrumentos valiosos e indispensáveis para muitas actividades (Machado, 2000).

Estes sistemas têm origem de uma confluência científica onde concorrem os vários campos aplicacionais, com origem na segunda metade do século XX. As suas variadas aplicações são fruto de grande desenvolvimentos, na forma de pensar e agir no espaço, por formas a detectar padrões, com base em análise espacial. Na verdade, a análise espacial realizada pelos SIG da actualidade não é nova, talvez seja apenas a expressão informatizada de análises sobre o espaço feitas no passado, com mapas em papel.

Os desenvolvimentos tecnológicos que incluem os SIG e a Internet revolucionaram a tomada de decisões de modo que os dados podem ser coleccionados, analisados, disseminados, e exibidos.

Actualmente a utilização dos Sistemas de Informação Geográfica para a tomada de decisões no sector público e privado tem aumentado muito. As agências que adoptam os SIG variam e, em muitos casos os resultados de sua utilização são os benefícios de eficiência (redução de custos, melhoria na produtividade, melhoria no atendimento aos clientes) e eficácia (melhoria na tomada de decisões, melhoria no planeamento e análise).

3.1- Definições de SIG

A questão da definição dos SIG é um assunto muito debatido no meio científico devido à ampla gama de aplicações que estas tecnologias de análise espacial têm oferecido nos últimos anos. (Bonham-Carter, 1994), afirma que o impacto da utilização dos SIG, tem sido notado em todos sectores que utilizam informação geográfica, como a gestão de recursos naturais, ocupação e uso do solo, transportes, geomarketing, geologia e outras.

Os SIG são sistemas computacionais usados para armazenar e manipular informação geográfica. Estes sistemas são concebidos para recolher, armazenar e analisar objectos e fenómenos em relação aos quais a localização geográfica é uma característica muito importante (Aronoff, 1989).

Podíamos elaborar aqui uma lista exaustiva com dezenas de definições de SIG, todas com intuito de apresentar as suas características aplicacionais e colocando ênfase num ou noutro aspecto específico. Para (Harvey, 2008), regra geral, a informação geográfica começa com a recolha de dados e termina com a elaboração de mapas e outro tipo de informação.

Chrisman (1999), coloca grande ênfase nas actividades e processos (operações e transformações) essenciais para o uso e desenvolvimento com sucesso de qualquer SIG. O mesmo autor apresenta três (3) aspectos importantes para tal sucesso:

- 1- A qualidade dos dados, que envolve a verificação das medições das representações geográficas em comparação com os objectos e eventos reais;
- 2- As operações e transformações usadas num SIG devem ser avaliadas e usadas em qualquer SIG;
- 3- As convenções originárias da sociedade, cultura e instituições requerem atenção para certificar-se que os dados correspondem precisamente aos

objectos e eventos e as operações e transformações tendo em conta os objectivos do SIG.

De acordo com Painho (2006), os SIG são de difícil definição [...] sendo possível, no entanto, conceber uma definição que engloba a tecnologia que os apoia (Hardware e Software), a base de dados (inclui a informação geográfica e outra com ela relacionada), os métodos utilizados na exploração dos dados e ainda a infra-estrutura que inclui os recursos humanos, as instalações e outros elementos de apoio.

As várias definições devem fazer convergir os propósitos e a importância das pessoas, das organizações e as normas ou padrões, pois só assim as mesmas definições serão inclusivas. Para Harvey (2008), os SIG não são apenas assunto para os tecnólogos, mas também das pessoas que trabalham na resolução dos mais variados problemas sociais, das organizações e suas normas desenvolvimento.

As aplicações dos SIG são variadas e as suas definições também o são, por isso, da mesma forma que uma organização elege que usos dar ao seu SIG para a resolução dos vários problemas quotidianos, deveremos fazê-lo com a definição, que deverá reflectir os objectivos, visão tecnológica e de recursos humanos da organização.

3.2- Evolução Histórica dos Sistemas de Informação Geográfica

A representação da realidade é um acto próprio do ser humano, na verdade representamos mesmo que seja apenas na nossa mente, os lugares que conhecemos no passado, os lugares em que vivemos e, até fazemos representações imaginárias do nosso futuro. Já nas civilizações pré-históricas a necessidade e a vontade de representar o espaço foi manifestada, sendo testemunhos claros do modo de vida destas civilizações nos dias actuais. Claro que naquela altura as pinturas rupestres em cavernas, os trabalhos feitos em argila, eram muito diferentes das representações actuais em que empregamos o papel ou o computador, mas

o objectivo, esse parece muito semelhante, continua a ser a orientação e representação do espaço geográfico.

A necessidade e vontade de representar os territórios conhecidos, conduziu a um novo campo do conhecimento, que iria culminar na ciência e arte que é a Cartografia dos dias de hoje. A Cartografia é a ciência que trata da concepção, produção, difusão e utilização das cartas (Gaspar, 2005).

Os SIG beneficiaram em grande medida dos desenvolvimentos da Cartografia temática, mas a história de desenvolvimento dos SIG parece ser um *continuum* da análise espacial derivada da sobreposição de mapas e a sua interpretação crítica. Podemos avançar alguns exemplos de *overlay* de vários temas, realizados no passado, como os mapas da batalha de Yorktown (Revolução Americana); O Atlas Irlandês dos transportes ferroviários elaborado no século XIX, representando os fluxos populacionais, a topografia e geologia das regiões; O mapa de John Snow, usado na identificação do foco responsável pelo surto de cólera em Londres e, muitos mais exemplos podiam ser avançados aqui. Na realidade, para muitos autores estes aspectos constituem o período dos SIG pioneiros nas décadas de 50 e 60 do século XX.

A história recente dos SIG no mundo mostra que é difícil apontar o período exacto para o seu início, porque os relatos sobre as primeiras experiências em muitos casos não existem ou, não foram tornados públicos por algumas organizações. O relatório de Rhind de 1976 (Coppock e Rhind, 1991) materializa um conjunto de esforços para o conhecimento dos primórdios dos SIG no mundo, esforços seguidos posteriormente por outros cientistas e organizações. Para (Foresman, 1998), existem dois grandes estudos que devem ser tidos em conta quando se traça uma história dos SIG no Mundo, o livro publicado por Coppock e Rhind no início da década de 90 e, a criação do NCGIA em 1988. Ambos traçam o percurso deste campo do saber onde destacam aspectos importantes como, o contexto envolvido no seu desenvolvimento, as instituições públicas e privadas, as pessoas e os períodos ou fases do desenvolvimento.

Apresentar cronologicamente a história desta ciência, parece ser uma alternativa de eleição para muitos estudiosos, onde os vários acontecimentos são agrupados em fases ou períodos como o fazem (Coppock e Rhind, 1991; Matos, 2001; Longley, et al, 2005) apresentando os aspectos importantes desde a fase pioneira até à fase actual. Longley, et al, (2005) preferem apresentar a história dos SIG, compartimentando-a em três períodos ou fases, que são a fase de inovação, a fase de comercialização e a fase de exploração.

Fase de inovação

Em meados da década de 60 do século XX é iniciado aquele que é tido como o primeiro SIG, o CGIS (*Canada Geographic Information Systems*), dirigido por Roger Tomlinson, para inventariação da ocupação e uso do solo nas várias regiões daquele enorme país. Neste período, outros esforços eram feitos nos EUA, na Europa e, pelo menos, na Austrália (Longley, et al, 2005).

Nos EUA destacamos para tal os trabalhos desenvolvidos no *Harvard Laboratory for Computer Graphics and Spatial analysis*, sob direcção de Howard Fisher, onde foram desenvolvidos vários programas como *SYMAP*, adquirido por mais de 500 instituições incluindo europeias e japonesas, sendo o primeiro software largamente difundido pelo mundo (Coppock e Rhind, 1991), sendo posteriormente lançados os programas, *CALFORM*, *SYMVU*, *GRID*, *POLYVRT*, *ODYSSEY*. Por este laboratório passaram mentes brilhantes tais como Jack Dangermond, da ESRI e Jim Meadlock da actual *Intergraph*, empresas bem sucedidas no mercado de geotecnologias. Ainda nos EUA, devemos ter em conta o grande contributo do *Census Bureau*, primeira entidade civil a adquirir um computador (Granchó, 2006) e, que foi responsável pelo *TIGER (Topologically Integrated Geographic Encoding and Referencing)* usado em topologia e edição topológica.

Na Europa dá-se grande destaque aos trabalhos realizados no Reino Unido por David Bickmore, que afirmava entre 1958 e 1960 que apenas os

computadores poderiam proporcionar um método eficaz e a custo aceitável para recolha, tratamento e edição de grandes volumes de dados geográficos (Coppock e Rhind, 1991).

D. Bickmore fundou em 1967 a *Experimental Cartography Unit* (ECU), que realizou várias actividades durante o seu funcionamento, como o desenvolvimento de programas, o primeiro mapa colorido a nível global e, iniciativa na venda de software próprio (Grancho, 2006).

Na Suécia, grandes desenvolvimentos foram também notáveis na fase pioneira, como os primeiros mapas meteorológicos computadorizados do Instituto de Meteorologia de Estocolmo, o primeiro trabalho de geo-referenciação do cadastro predial (Idem).

Fase de comercialização

Esta fase beneficiou grandemente dos progressos obtidos pela Informática, no que toca à diminuição do preço dos computadores e o desenvolvimento na área dos softwares. Assim, começam a consolidar-se neste novo cenário os grandes produtores de softwares como a *ESRI*, a *INTERGRAPH*, *ERDAS*, *MAPINFO*, *IDRISI*, *GRASS*, *SMALLWORLD*, que ainda hoje contribuem para esta enorme indústria.

As técnicas de aquisição de informação em que se destacam os satélites de detecção remota e de posicionamento global aumentaram a disponibilidade de dados para estudo e análise das várias áreas terrestres, dando um impulso qualitativo no tipo de informação existente.

A produção literária marca também aqui um ponto de viragem importante, pois surgem várias revistas da especialidade, jornais como o *International Journal of GIS*, o *Big Book of GIS* e muitos mais.

O NCGIA é fundado em 1988 apoiada pela iniciativa da *National Science Foundation* (NSF), objectivando a realização de uma investigação acerca dos Sistemas de Informação Geográfica (Grancho, 2006). Devido ao avolumar de actividades confiadas ao NCGIA, em 1991, surge o *University*

Consortium for Geographic Information Science (UCGIS) formado inicialmente por dezasseis universidades do Oeste dos *EUA*. Estas duas organizações têm sido responsáveis pelo desenvolvimento de vários projectos na área da ciência de informação geográfica, dando-se grande destaque ao *The GIS History Project*, iniciado em finais de 1996 pelo *NCGIA*, com a finalidade de compilar, gerir a pesquisa e disseminar a história crítica dos Sistemas de Informação Geográfica no mundo. Ainda neste período são introduzidos os produtos de SIG pela Internet por várias organizações.

Fase de Exploração

Nesta fase a tecnologia transita dos organismos públicos e empresas de pequena dimensão, para a utilização directa do cidadão, através da internet e dos serviços baseados em posicionamento (Matos, 2001).

O ensino sobre este campo do saber toma uma dimensão mundial, os cursos começam a ser ministrados em várias universidades espalhadas pelo planeta. A indústria de GIS consegue lucros bilionários, a disponibilidade de dados cresce muito com a disponibilização pela internet de dados e informação muitas vezes gratuita de vários actores como do *Google Earth* e *Google Maps*, *SRTM*, *ASTERGDEM*, que veio facilitar a utilização destes, até para os indivíduos pouco conhecedores da informação geográfica.

Hoje os mapas estão presentes nos telefones móveis, nos GPS dos carros e em muitas outras aplicações, o que ilustra o vigor e a importância dos SIG para a humanidade.

Analisada a história dos SIG, desde a década de 50 e 60, até aos nossos dias concluímos que esta tecnologia que surgiu primeiramente na América do Norte, passou por um conjunto de etapas em que vários intervenientes, em várias regiões mundo muito contribuíram com o seu saber, para o seu desenvolvimento e estado actual.

3.2 - Componentes dos Sistemas de Informação Geográfica

Para que os SIG se apresentem como ferramentas capazes e seguras, na resolução de problemas espaciais deve-se ter em conta a forma como se estruturam e organizam as suas várias componentes. As diversas componentes dos SIG devem actuar e ser geridas com igual importância, se o que, o sistema não funcionará (Machado, 2000).

As componentes dum SIG podem ser visualizadas na figura 6 mais adiante e são: Hardware, software, dados, os indivíduos e os processos de análise de informação.

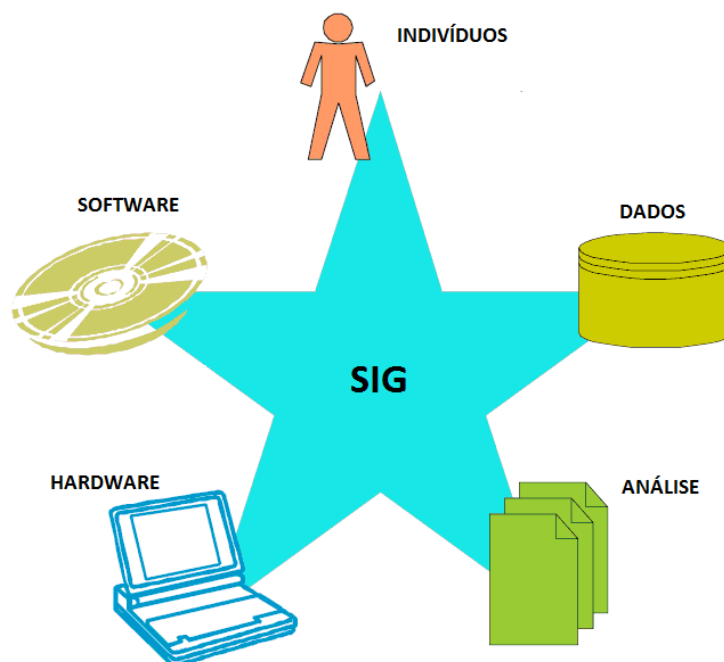


Figura 6. Componentes dos SIG: Modificado de Zeiller, 1999

Hardware - Constitui o conjunto de equipamentos utilizados para processar e armazenar de forma automática a informação. Nesta categoria vamos incluir os computadores, servidores, impressoras, mesas digitalizadoras, receptores de GPS, videoprojectores que são usados nos processos de análise, armazenamento e gestão dos dados, visualização e disseminação da informação.

Software - Constitui a parte lógica do computador, ou conjunto de instruções e programas que tornam possível o desenvolvimento de operações automáticas.

A indústria de softwares é uma indústria muito promissora nos nossos dias, quer seja pelo volume de negócios, quer seja pela oferta contínua de novos produtos. A área de informação geográfica tem beneficiado dos grandes desenvolvimentos operados no ramo dos softwares. Neste campo devemos destacar o elevado nível de sofisticação atingido pelos softwares comerciais e também os softwares livres, com grande destaque para o *WebGIS*.

Como afirma Burrough (1986) citado por Machado (2000), são cinco os conjuntos gerais de softwares a considerar em SIG:

- 1- De entrada de dados e a sua verificação e correcção;
- 2- De armazenamento e gestão das Bases de Dados;
- 3- De transformação e análise dos dados;
- 4- De saída de dados e a sua apresentação;
- 5- De interacção entre máquinas e utilizadores.

Os indivíduos - constituem o grupo de especialistas que têm como missão o desenvolvimento de actividades que visam dar resposta aos problemas geográficos quotidianos. Nos dias que correm a sociedade tem testemunhado a existência de computadores com hardware e software de ponta, por isso espera-se que tenhamos também os operadores mais experientes.

A viabilidade de implementação de um SIG, tem forte dependência das capacidades intelectuais e humanas de seus dirigentes e colaboradores, destacam-se capacidades como a inteligência, a generosidade, a criatividade, abertura e capacidade de trabalho (Machado, 2000).

Análise - processo no qual os dados importados pelo nosso SIG, são transformados pelo operador com intuito de gerar informação e conhecimento.

A análise é o processo que na verdade diferencia os SIG de outros programas utilizados para visualização de mapas devido as suas ferramentas analíticas e também porque os dados recolhidos no campo, depois de árduo trabalho são processados por operações complexas de sobreposição, interpolação, recorte, união, consulta de bases de dados para responder questões levantadas pelos peritos.

Dados – são representações de factos, eventos ou fenómenos que servem de veículo para interpretação de um aspecto qualquer depois de processados pelo homem ou por processamento automático. Em sistemas de informação geográfica falamos de dados geoespaciais por conterem o elemento inerente a localização geográfica. Esta componente é muito importante em SIG e sem a mesma não há a possibilidade de qualquer projecto ir avante.

Em muitos projectos envolvendo os SIG, o operador tem a necessidade de criar ou converter dados para os seus propósitos. Para Sherman (2008) existem muitas formas de criar ou converter dados adaptados aos nossos propósitos:

- 1- Digitalização;
- 2- Importação de textos e outras fontes;
- 3- Conversão de dados;
- 4- Importação de dados de GPS;
- 5- Georreferenciação de imagens.

A natureza dos dados tem forte influência no modo como a análise é conduzida. Os dados espaciais em SIG estão geralmente organizados em estruturas de dados raster e vectores (Johnson, 2009).

Na estrutura vectorial, que se observa na figura 7 abaixo os objectos geográficos são representados por pontos linhas e polígonos. Os pontos são adimensionais, representam elementos menores do que aqueles representados pelas linhas e pelos polígonos, e, possuem um par de coordenadas ligado aos atributos na tabela.

As linhas são primitivas que descrevem elementos numa dimensão e um sistema de coordenadas, representam elementos estreitos como rios, estradas, que não são representados por polígonos.

Os polígonos são utilizados para descrever o tamanho e a forma das entidades espaciais representadas. Estes são bidimensionais representando limites de municípios, classes de ocupação do solo, etc.

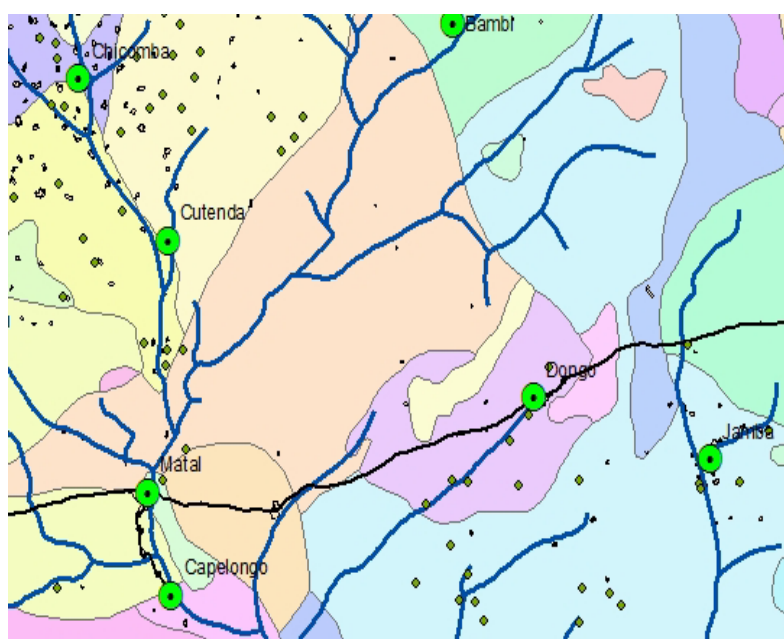


Figura 7. Representação Vectorial. Adaptado da carta dos limites Administrativos de Angola.

A estrutura raster figura 8 abaixo, o espaço apresentasse dividido numa grade de células bidimensionais, onde cada célula contém o valor do atributo a ser mapeado. A grade é formada por linhas e colunas com origem no canto superior esquerdo. Um raster pode representar uma imagem de satélite, um modelo digital de elevação, uma amostra de floresta ou, uma fotografia georreferenciada.

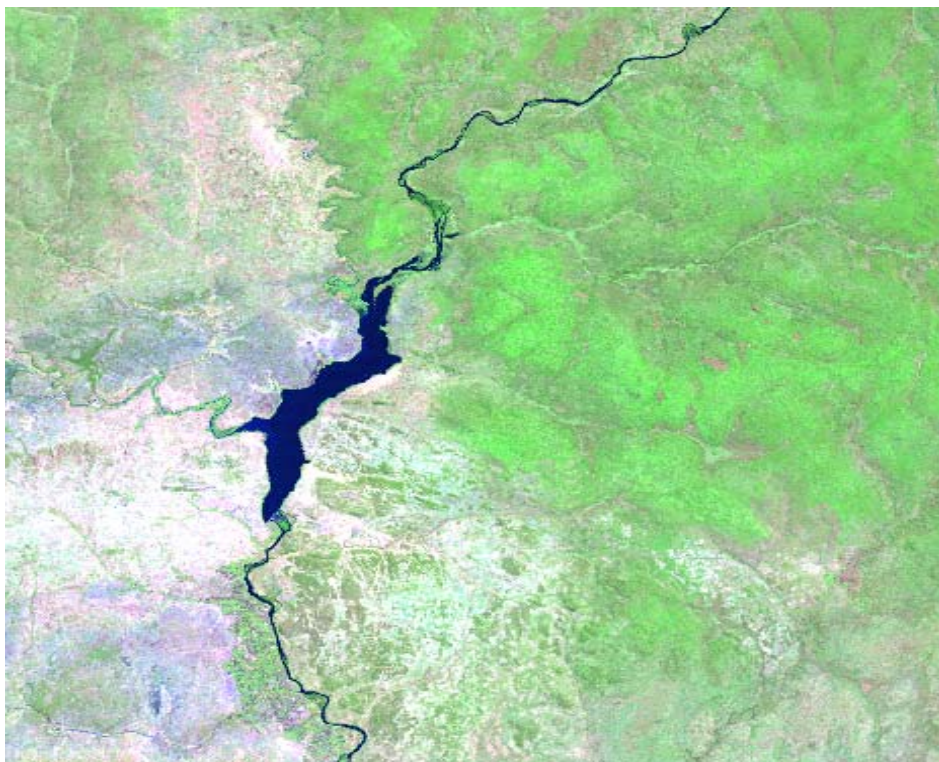


Figura 8. Representação raster gerada de uma cena Landsat a leste da área de estudo

Na tabela 4, mostrada a seguir e que continua na página seguinte, estão presentes de forma resumida as principais características dos dois modelos de dados, o modelo raster e o modelo vectorial, que são muito usados em SIG.

	Modelo Vectorial	Modelo Raster
Essência do modelo	Na sua essência são objectos discretos, com formas e fronteiras precisas.	Essencialmente lida com fenómenos contínuos e imagens.
Fonte dos dados	Levantamento com GPS, vectorização de fotografia aérea e outros rasters, digitalização de mapas e outros documentos, importação de ficheiros CAD.	Fotografia aérea, imagens de satélite, conversão por triangulação, rasterização de vectores, scaneres.

Continua na página seguinte

Continuação da tabela da página anterior		
Armazenamento	Pontos armazenados por pares coordenados; Linhas são armazenadas como segmentos conectados por pares coordenados; Polígonos são segmentos fechados.	A partir de uma coordenada no canto superior esquerdo do raster. Cada célula é localizada pela posição da sua linha e coluna.
Características das Representações	Os pontos representam componentes pequenos; Linhas representam componentes longos e estreitos e os polígonos abarcam áreas	Os pontos são representados como células isoladas; As linhas por uma série de células adjacentes com valores comuns; Os polígonos por sua vez por uma região de células com valor comum.
Tipos de análises espaciais	Sobreposição; Geração de buffers; Dissolve de polígonos; União; Consulta; Geocodificação de endereços; Análise de redes.	Análise de superfície; Caminho de menor custo, Sobreposição; Proximidade
Outputs	Adequado para fenómenos e objectos com fronteiras discretas	Adequado para representação de imagens e fenómenos contínuos

Tabela 4. Principais características dos modelos raster e vectorial adaptadas de Zeiler, 1999.

A tabela mostrada acima é continuação da página anterior e, refere-se as principais características dos modelos de dados raster e vectorial.

3.4 - Os Sistemas de Informação Geográfica Aplicados ao Sector Mineral

Nas últimas décadas os SIG vêm-se apresentando como ferramentas muito úteis nas várias actividades de gestão de recursos naturais. A sua enorme capacidade de armazenar, organizar, gerir extensas bases de dados, de produzir análises complexas com base nos dados, torna-os indispensáveis em operações ligadas aos sectores de recursos naturais.

O sector mineral, em todas suas fases, desde a pesquisa e prospecção, até ao fecho da mina, afigura-se, como uma área onde os SIG têm marcado uma presença indiscutivelmente benéfica ao longo dos últimos anos. No passado, as companhias mineiras usavam técnicas de sobreposição de mapas em papel, como os geológicos, geoquímicos, geofísicos e muitos outros para a localização de jazigos, mas com os desenvolvimentos operados no ramo da informática, ligados principalmente ao aumento do poder de processamento dos computadores e a diminuição dos preços, adicionados ao desenvolvimento das ciências espaciais como os SIG, a sobreposição passou a ser feita por estes sistemas.

A utilização dos SIG, em qualquer sector deve ser feita de forma criteriosa, porque as operações envolvem muitas vezes aspectos complexos e, para tal os especialistas devem recorrer a utilização de modelos, especificamente para o caso da exploração mineral, recorrem a modelos de prospecção ou exploração (Quadros, 2000).

A exploração mineral é uma actividade com várias fases, dirigida para a selecção de zonas- alvo onde há a presença de um mineral qualquer (Bonham-Carter, 1994).

A construção do modelo de exploração mineral em SIG obedece a um conjunto de fases hierarquicamente dependentes. Na figura 9 apresenta-se a estrutura do modelo de exploração e as fases a ter em conta na sua implementação.

1) O modelo conceptual

Os depósitos de minerais de ferro são variados na natureza como vimos no segundo capítulo do presente trabalho. Com vista à realização dum trabalho de exploração mineral, há necessidade de caracterizar claramente o tipo de modelo de depósito, só assim o processo nos conduzirá a um resultado de interesse. Os modelos de depósitos minerais são modelos conceptuais, usualmente descritos por palavras e diagramas, em que as relações teóricas entre os vários processos clarificam como e, especialmente onde, os depósitos minerais de um tipo qualquer podem ocorrer (Carranza, 2009).

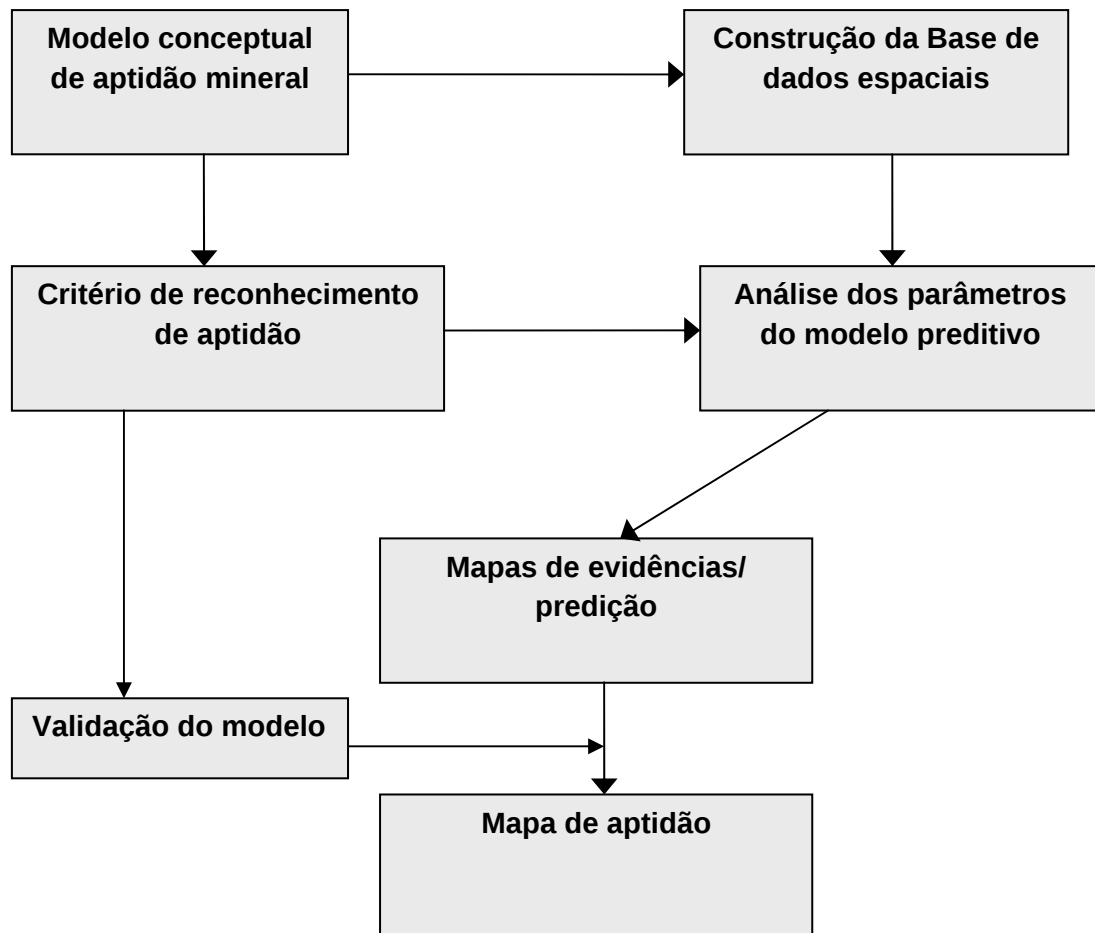


Figura 9. Diagrama do modelo de exploração adaptado de Carranza, 2009.

Para Hodgson (1990) citado por Bonham-Carter (1994), os modelos descrevem as características típicas de um grupo de depósitos, acompanhadas por uma interpretação dos processos de formação dos depósitos e são úteis por servirem de critério para exploração mineral. Podemos dizer que os modelos nos fornecem informação relativa às características principais dos depósitos e a sua respectiva génese.

Os modelos fornecem a base teórica para a utilização dos SIG em estudos desta natureza. Se partirmos do pressuposto que os SIG são ferramentas excelentes para integração de dados georreferenciados das mais variadas aplicações, logo também o serão para integração dos dados resultantes dos vários modelos de exploração mineral.

Os depósitos minerais de ferro da região da Jamba em Angola, pertencem a um grande grupo de depósitos de ferro existentes em varias regiões do planeta denominados de Itabirítos. Os modelos de exploração existentes sobre estes depósitos minerais, foram elaborados com base em estudos de depósitos importantes, a título de exemplo temos: A Região do Lago Superior na América do Norte; Região do *Transvaal* na Africa do Sul; Região de *Krivoy Rog* na Ucrânia; Região de Minas Gerais no Brazil; Bacia de *Hamersley* no Oeste da Austrália.

As características destes depósitos podem ser tidas em conta para caracterização de modelo de deposito da Jamba, já que este, apresenta características similares as descritas nos depósitos conhecidos noutras regiões.

Podemos agora apresentar uma síntese das principais características destes depósitos, que servirão na selecção dos dados, no escolha do tipo de processamento a realizar, e na decisão das características, ou seja factores de evidência, por altura da integração dos dados em ambiente SIG, para conformação do mapa final de aptidão.

Autores como James (1983) e Cannon (s/d) citados por Cox e Singer (1986), apresentam resumidamente as principais características dos depósitos das formações ferríferas bandadas(BIF).

- O ambiente geológico caracteriza-se formações ferríferas de origem sedimentar e química, constituídas por uma mistura de óxidos, silicatos, carbonatos e sulfuretos, intercalados por camadas minerais de ferro e minerais de quartzo e silício.
- Estão geralmente associadas a rochas basálticas, quartzíticas, dolomíticas, carbonatíticas e outras sedimentares que sofreram elevado metamorfismo.
- Atribui-se a sua formação considerando vários depósitos espalhados pelo mundo a fenómenos ocorridos durante a era Arcaica e principalmente Proterozóica (2,2 - 0,2 Bilhões de anos).
- O ambiente deposicional resulta de precipitação singenética em ambientes marinhos de minerais ricos em ferro causada por processos hidrotermais.
- Estas formações encontram-se largamente distribuídas por regiões de plataforma continental ou em escudos proterozóicos tectonicamente estáveis.
- Os principais minerais são a magnetite, hematite, siderite e quartzo.
- Assinatura geofísica, caracterizam-se pela detecção de anomalias magnéticas.

2) Critérios de reconhecimento da aptidão

Depois de conhecidas as características do modelo conceptual, é altura de definir-se os critérios para reconhecimento da aptidão mineral na área de estudo. Estes critérios, são especificamente as componentes geológicas, geoquímicas, geofísicas, e de assinaturas espectrais, que caracterizam a área mineral em análise.

Para Carranza (2009), o modelo conceptual e os critérios de reconhecimento da aptidão fornecem o contexto para desenvolvimento de modelos de aptidão mineral sustentáveis.

3) Construção da base de dados

A criação de bases de dados SIG é uma operação muito importante nos vários projectos de análise espacial. Para o nosso caso concreto esta etapa é alcançada com a criação e organização da colecção de mapas e tabelas, armazenados num sistema de gestão de bases de dados.

As fontes de dados a integrar numa base de dados geográfica são diversas e provêm de variadas fontes. Burrough e McDonnell (1998), apontam como fontes de dados para os SIG as seguintes: A aquisição de dados SIG a partir de organismos estatais e privados; Digitalização de dados em formato analógico; Levantamento de dados no terreno, e geração de superfícies contínuas a partir de pontos observados.

Os dados depois de importados pelo SIG podem ser manipulados, transformados e actualizados para as várias operações futuras. Assim durante o processamento dos dados várias operações de transformação/conversão de dados são efectuadas, destacando a conversão vector - raster, conversão para mapas binários, etc.

4) Análise dos parâmetros do modelo preditivo

Esta etapa constitui-se dum conjunto de operações que visam principalmente a extracção de informação. Assim são executadas técnicas de realce e extracção de evidencias/particularidades dos dados geocientíficos, técnicas de atribuição de pesos as classes individuais de aptidão com objectivo de representar os critérios de reconhecimento da aptidão.

Nesta etapa o objectivo da modelação ou transformação dos mapas de evidências serve para distinguir o grau de presença das evidências numa área considerada (Carranza, 2009).

5) Factores de evidência ou de predição

Estes temas são utilizados na integração e resultam de transformações com objectivo de otimizar a extracção de informação (Quadros, 2000). Considera-se como factor, o *layer* de interesse que será utilizado na integração para formação do mapa final. Os factores utilizados para o presente estudo são de forma resumida apresentados abaixo.

- a) **Factor geológico** - constituído pelas unidades geológicas, pela litologia e pela geocronologia que circunscreve a área de interesse.
- b) **Factor alteração hidrotermal** - constituído por uma imagem *LandSat TM* da área de estudo, onde a partir de técnicas de detecção remota são realçadas as áreas de alteração hidrotermal.
- c) **Factor ocorrências minerais** - formado por uma tabela e um ficheiro *shapefile* composto pelas ocorrências minerais conhecidas na área.
- d) **Factor geoquímico** - mapa resultante da interpolação em que os pontos amostrais representam diferenças nos teores de ferro.

Estes são os factores importantes a ter em conta na integração dos dados. A integração de dados para mapeamento da aptidão mineral em SIG, faz-se com recurso a duas abordagens distintas. A abordagem dirigida pelos dados do inglês ***Data-driven*** e a abordagem dirigida pelo conhecimento do inglês ***Knowledge-driven***.

Abordagem dirigida pelos dados

É utilizada geralmente quando se estudam regiões onde existem dados geocientíficos suficientemente conhecidos, como os depósitos minerais, dados geoquímicos, geofísicos e outros de interesse (Quadros, 2000; Tangestani e Moore, 2001; Knox-Robinson, 2000; D'Ercole, et al, 2000; Carranza et al, 2008; Ford e Blenkinsop, 2008; Wang e Chen, 2008). Esta abordagem assume que todos depósitos têm génese comum. Os métodos utilizados nesta abordagem são variados.

Abordagem dirigida pelo conhecimento

São examinados os processos e factores que lideram a formação de depósitos minerais. O modelo conceptual é dissecado nos seus constituintes e a partir destes são identificados os factores críticos para a formação dos depósitos. Neste tipo de modelos há necessidade de conhecimento por parte do especialista dos processos e factores para formação dos depósitos minerais.

Esta abordagem pode ser utilizada em áreas pouco ou nunca exploradas, com características similares daquelas que se tem conhecimento da existência mineral (Knox-Robinson e Wyborn, 1997; Bonham-Carter, 1997, Quadros, 2000; Carranza et al 2008; Nykänen, 2008).

A utilização destas abordagens é feita com recurso a vários métodos, como podemos ver na tabela 5 mais abaixo.

ABORDAGEM	PARAMETROS DO MODELO	EXEMPLOS
DATA-DRIVEN	Modelo dirigido pelos dados	Regressão logística
		Pesos de evidência
		Redes neuronais
KNOWLEDGE-DRIVEN	Modelo dirigido pela experiência, ou seja pelo especialista	Teorema de Bayes
		Lógica Fuzzy
		Modelo de Dempster-Shafer

Tabela5. Abordagens utilizadas no mapeamento do potencial mineral Fonte: Adaptado de Bonham-Carter, 1997

6- Validação do modelo

O melhor modelo preditivo é aquele onde há abundância de valores de predição, correspondentes as ocorrências a nível do terreno. Este é um elemento importante a ter em conta por altura da validação do modelo.

Para Carranza et al (2008), a validação do modelo pode ser feita durante as várias etapas do seu desenvolvimento, sendo analisadas a distribuição dos depósitos minerais que se deseja e as associações espaciais entre os depósitos minerais conhecidos e certas características geológicas.

3.4.1- Exemplos de aplicação dos SIG ao sector mineral

A utilização crescente dos SIG, prova a sua enorme capacidade em contribuir para solução dos problemas quotidianos de gestão do espaço. A área dos recursos minerais é grandemente beneficiada pelos desenvolvimentos operados nestes sistemas. As organizações que utilizam estas tecnologias beneficiam, com melhorias na gestão de dados, redução de custos e de riscos, melhorias nas suas estratégias de pesquisa e predição de novas áreas de exploração para trabalhos futuros e na apresentação da informação.

A predição de novas áreas de exploração de minérios alicerçada pelos SIG, deve o seu aparecimento aos trabalhos desenvolvidos nas décadas e 80 e 90 por vários cientistas, em que destacamos os trabalhos dos investigadores ligados aos Serviços Geológicos dos EUA e Canada, onde mentes brilhantes desenvolveram conjuntos de programas para integração de dados geológicos e estatísticos para aplicação na exploração mineral. Resulta deste trabalho de intercâmbio internacional o *Arc-WofE*, uma extensão do *ArcView* da *ESRI*, desenvolvido pelo *US Geological Survey* e o *Geological Survey of Canada*, com o contributo das multinacionais tais como a *Western Mining Corporation*, *BHP*, *Barrick Gold Corporation*, *Inco Limited*, *Placer Dome Inc* e a *PT Freeport* Indonésia (Raines et al, 2000). A extensão *Arc-WofE* está disponível desde 1999, e pode ser descarregada gratuitamente, requerendo apenas a licença do *ArcView Spatial Analyst* para funcionar

normalmente. Basicamente este aplicativo usa associação estatística entre os pontos ou sítios de treino, que geralmente são depósitos minerais conhecidos e os temas de evidência que são as características litológicas, geoquímicas, geofísicas para determinar os pesos e consequentemente a aptidão mineral.

A seguir são apresentados de forma resumida alguns exemplos da utilização dos SIG e das abordagens *Data-driven* e *Knowledge-driven* na pesquisa mineral.

Exemplo 1- Faulkner et al; (2007), apresentam um resumo sobre o estudo do potencial mineral de Ferro, na região sul da Austrália, para melhorar o mapa de ocorrências minerais então existente. A região contém importantes depósitos de BIF que entre 1915-1965 foram as principais fontes de minério para a indústria de aço australiana.

Os depósitos de ferro encontram-se localizados numa região onde as anomalias magnéticas são significativas para sua interpretação e estudo em SIG.

O processamento de dados consistiu num conjunto de operações onde foram realizadas sobreposições das imagens aeromagnéticas aos dados geológicos para realçar as ocorrências e depósitos de minérios de hematite associados aos BIF.

A selecção dos locais alvo, baseou-se na: - presença de anomalias magnéticas moderadas e elevadas (5000-7500nT) associados a valores elevados de gravimetria; -Proximidade dos depósitos conhecidos às zonas de magnetismo elevado.

Basicamente, as operações sobre os dados consistiram na criação de *buffers* de 2km ao redor das anomalias superiores a 5000nT, eliminação de polígonos com áreas inferiores a 0,5 km², posteriormente estes foram sobrepostos ao mapa geológico e aos depósitos conhecidos e todas outras

áreas retiradas do estudo. O resultado final permitiu aos autores aumentar os conhecimentos sobre a área.

Exemplo 2- Nykänen (2008), na sua Tese de doutoramento intitulada *Spatial data analysis as a tool for mineral prospectivity mapping*, apresenta um conjunto de aspectos importantes para o mapeamento mineral de ouro na região setentrional do escudo escandinavo, correspondente ao território da Finlândia.

O autor utiliza os SIG, otimizados por ferramentas como, os pesos de evidência, regressão logística, lógica fuzzy e redes neuronais, para o respectivo mapeamento mineral.

Como critérios de reconhecimento da aptidão, o autor elege; (i) os dados aerogeofísicos, (ii) dados gravimétricos, (iii) dados geoquímicos, (iv) o mapa geológico.

Os parâmetros utilizados no modelo preditivo foram; (i) fraco magnetismo e fraca resistividade das rochas, (ii) elevados valores de gravimetria, (iii) anomalias de As; Au; Cu; Fe; Ni e Te nos sedimentos, (iv) proximidade das falhas, (v) dados paleontológicos, (vi) proximidade das rochas metabasálticas.

Os factores derivados destes parâmetros, foram integrados em SIG, com a ajuda do SDM, foram gerados os mapas de evidências e os mapas de aptidão. O autor utiliza aqui a abordagem *data-driven* e a abordagem *knowledge-driven*, clarificando a importância destas para estes estudos. Os resultados foram validados tanto estatisticamente, como no campo, provando a eficácia destes modelos para o conhecimento e avaliação do potencial mineral.

Exemplo 3 - Carranza e Sadeghi (2010), no trabalho intitulado *“Predictive mapping of prospectivity and quantitative estimation of undiscovered VMS deposits in Skellefte district (Sweden)”* explicam como as técnicas de análise

espacial podem ser úteis, na descoberta de novas zonas de exploração de minérios, usando os dados dos depósitos conhecidos.

Para os autores a distribuição espacial dos depósitos e ocorrências minerais conhecidas é fulcral para o mapeamento de zonas de exploração futuras e para tal, apresentam uma solução em que analisam a distribuição espacial dos depósitos de VMS (*volcanogenic massive sulphides*) conhecidos e as associações com as características geológicas.

O conhecimento dos aspectos geológicos importantes na mineralização destes tipos de depósitos, serviram para definir os critérios de reconhecimento da aptidão.

Os *layers* usados no estudo foram: O mapa de pontos representando os 69 depósitos conhecidos; o mapa geológico (litológico e estrutural); o mapa geoquímico representando a distribuição espacial de Cu, Zn e Pb em sedimentos; o mapa de anomalias gravimétricas e, o mapa de anomalias magnéticas.

Durante a integração dos dados foram realizadas operações de processamento e as evidências foram sendo analisadas de acordo com o conhecimento geológico. A análise *point-in-polygon*, que consiste em converter os atributos dos pontos observados em atributos de polígonos por métodos interpolativos ou não interpolativos (Bonham-Carter, 1994) e as análises de proximidade foram tidas em conta para ilustrar a relação entre a geologia, geoquímica, geofísica e os depósitos conhecidos. Foram eleitos com critérios de reconhecimento da aptidão os seguintes (i) Presença de rochas do grupo *Skellefte*; (ii) Proximidade entre as falhas e as rochas graníticas; (iii) Proximidade dos contactos entre os grupos *Skellefte-Vargfors*; (iv) Anomalias de Cu, nos sedimentos $\geq 23\text{ppm}$; (v) Anomalias de Zn nos sedimentos $\geq 70\text{ppm}$; (vi) Anomalias gravimétricas entre (-39,83 e -29,92 *mGal*); Anomalias magnéticas entre (-22 e 353 *nT*).

Para a geração do mapa de aptidão mineral foi utilizada a abordagem *data-driven* onde os *layers* representando os critérios de reconhecimento espacial

da aptidão foram ajustados para gerar os MOS (*mineral occurrence scores*), atribuindo valores entre 1 (favorável) e 0 (não favorável).

Podemos concluir que os desenvolvimentos no sector das novas tecnologias têm permitido uma maior adequação dos métodos de obtenção de informação e gestão do espaço. A gestão mineral é uma área que muito tem beneficiado dos desenvolvimentos dos SIG e da detecção remota. Os SIG quando usados na gestão mineral como recurso a abordagens e modelos especializados, permitem a caracterização e até a descoberta de novos jazigos e ocorrências minerais.

4- PROCESSAMENTO E INTEGRAÇÃO DOS DADOS ESPACIAIS E ALFANUMÉRICOS PARA DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL MINERAL

Neste capítulo aborda-se o processamento de dados feito antes da integração para geração do mapa final. São realizadas nesta fase transformações sobre os dados. As transformações servem essencialmente para preparação dos dados digitais, para sua análise e posterior incorporação no software específico.

O processo metodológico utilizado no processamento e integração de dados está resumido na figura 10 abaixo.

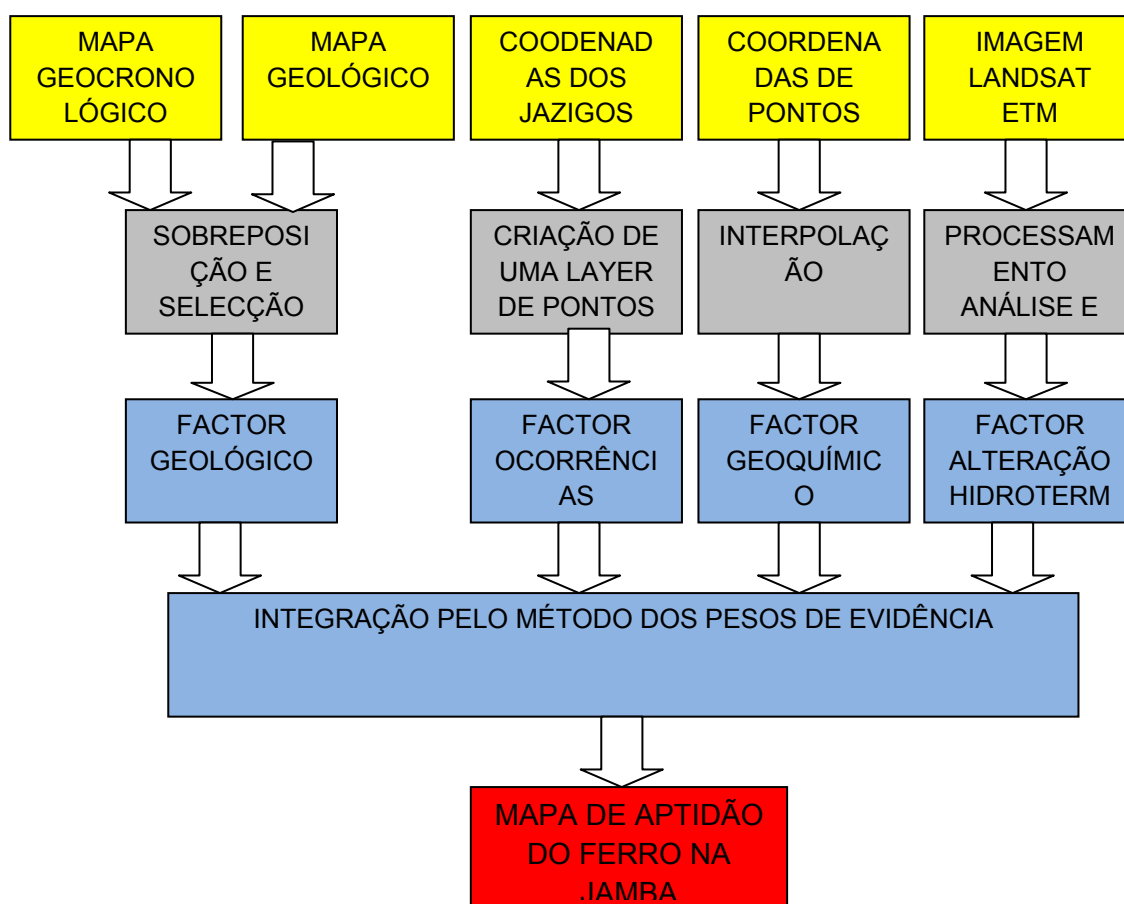


Figura 10. Fluxograma das operações de análise espacial

As transformações de dados mais comuns em trabalhos de modelagem geoquímica e de pesquisa mineral passam pelas conversões de pontos em áreas, pontos em superfícies, área em ponto, área em área, dilatação de entidades, operações de classificação e reclassificação (Bonham-Carter, 1994; Quadros, 2000; Carranza, 2009). No final apresentamos as etapas envolvidas na utilização do método dos pesos de evidência e o mapa de probabilidade posterior. O processo metodológico está resumido na figura 10 que representa o fluxograma das operações de análise espacial.

4.1- Conversão de pontos em áreas e superfícies

Grande parte dos factos levantados no campo com ajuda dos sistemas de posicionamento global e não só, é recolhida na forma de pontos. Os pontos podem representar vários aspectos, como uma amostra de minério, um furo feito para prospecção, pontos cotados, marcos geodésicos ou outros aspectos de interesse. Muitas vezes o analista de sistemas de informação geográfica tem a necessidade de trabalhar com dados relativos a superfícies, e nestes casos, pode sempre converter os dados do formato vectorial, neste caso pontos para polígonos ou para superfícies

A transformação de pontos para áreas é feita mediante a utilização de métodos não interpolativos ou por métodos interpolativos.

Os métodos não interpolativos, compreendem as transformações dos pontos em polígonos em que estes últimos passam a conter os atributos dos primeiros.

Existem muitas variantes destes métodos, por exemplo as transformações vector-raster em que cada ponto corresponde a uma célula no novo raster criado; geração de polígonos *Thiessen*; geração de polígonos circulares ao redor de cada ponto com origem no seu centro, onde o tamanho do polígono é escolhido subjectivamente pelo analista e representa a zona de influência do ponto; geração de polígonos de densidade como os de *Kernel* que estimam a densidade de uma variável aleatória com base em valores conhecidos.

Os métodos interpolativos por sua vez geram superfícies contínuas a partir de valores discretos. Os dados espaciais contínuos são bastante úteis nos vários estudos ambientais, mas a sua aquisição ainda é bastante dispendiosa, pelo que as várias empresas e instituições colectam amostras pontuais nos vários levantamentos de campo, quer sejam geofísicos, geoquímicos hidrológicos ou outros, e para isso recorrem a técnicas robustas de interpolação espacial.

O principal objectivo da interpolação espacial é gerar superfícies contínuas a partir de outras descontínuas, pela aplicação de técnicas variadas de interpolação.

A interpolação é definida como o processo através do qual é estimado o valor de uma quantidade, num ponto intermédio enquadrado por valores conhecidos da mesma quantidade, assumida uma certa lei de variação (Gaspar, 2004). O processo de interpolação espacial baseia-se na primeira lei da Geografia de Tobler, que aponta para auto correlação espacial.

Para Li e Heap (2008) existem três grupos de métodos interpolativos; 1- métodos não geostatísticos; 2- métodos geostatísticos; 3- métodos combinados.

Os métodos não geostatísticos ou determinísticos formulam suposições gerais sobre o carácter da superfície a interpolar e, em função destas estabelecem funções de interpolação (Torrecilla, 2006). Estes métodos se subdividem em dois grupos: - Globais, têm em conta todos pontos amostrais em qualquer valor estimado; - Locais, modelam a superfície tendo em conta os pontos amostrais da vizinhança de cada ponto não amostral.

Os métodos geostatísticos analisam o carácter da auto correlação espacial da variável a interpolar, usando pontos amostrais (Torrecilla, 2006). Os métodos geostatísticos de acordo com a quantidade das variáveis podem ser; univariados, quando o modelo é estimado para uma variável de cada

vez ou; multivariados quando utilizam muitas variáveis ao mesmo tempo. Este conjunto de métodos geostatísticos, geram superfícies que incorporam as propriedades estatísticas dos dados amostrais e que proporcionam uma medida do erro das mesmas, onde o erro é indicador de boa ou de má predição. Tais métodos constituem o grupo das técnicas de Krigagem e Cokrigagem.

Os métodos combinados consideram para além das variáveis amostrais outros aspectos secundários, que explicam de maneira significativa a distribuição espacial dos fenómenos. Li e Heap (2008) falam de procedimentos de classificação antes da interpolação, combinado assim as técnicas.

Na tabela 6 apresentamos a classificação dos métodos de interpolação espacial segundo Li e Heap (2008).

4.2- Área de estudo

O trabalho de pesquisa foi realizado, na região norte da Jamba, correspondendo a uma área de 1345km² de extensão, e foi delimitada a partir das folhas 340 e 341, da carta topográfica de Angola, elaborada pelo Instituto Geográfico e Cadastral de Angola, na escala de 1:100000.

4.3- Factor ocorrências minerais

As informações sobre as ocorrências de minério de Ferro na zona de estudo, foram adquiridas de relatórios internos do Ministério da Indústria Geologia e Minas e do catálogo dos recursos minerais de Angola, produzido pelo Instituto Geológico Angolano. Neste catálogo constam as ocorrências de Ferro, georreferenciadas, com atributos como, teor de ferro, nome e, para algumas ocorrências as reservas de ferro estimadas.

Estes dados foram convertidos para o formato digital originando um ficheiro do *Excel* tipo *x/s*. Posteriormente foi necessário transformar as coordenadas geográficas para métricas no sistema UTM.

Non-geostatistical	Geostatistical		Combined method
	Univariate	Multivariate	
Nearest neighbours	Simple kriging	Universal kriging	Classification combined other interpolation methods
Triangular irregular network related	Ordinary Kriging	SK with varying local means	Trend surface analysis combined with kriging
Interpolations	Block kriging	Kriging with an external drift	Lapse rate combined with kriging
Natural neighbours	Factorial kriging		
Inverse distance weighting	Dual kriging	Simple cokriging	Linear mixed model
Regression models	Indicator kriging	Ordinary cokriging	Regression trees combined with kriging
Trend surface analysis	Disjunctive kriging	Standardised OCK	Residual maximum likelihood-empirical best linear unbiased predictor
Splines and local trend surfaces	Model-based kriging	Principal component kriging	Regression kriging
Thin plate splines	Simulation	Colocated cokriging	Gradient plus inverse distance squared
Classification		Kriging within strata	
Regression tree		Multivariate factorial kriging	
Fourier Series		Indicator kriging	
Lapse Rate		Probability kriging	
		Simulation	

Tabela 6. Classificação dos métodos de interpolação

A figura 11 representa o fluxograma seguido, para a selecção do factor ocorrências minerais, que no método dos pesos de evidência é extremamente importante. Em todas as etapas as ocorrências minerais são usadas para calcular os pesos e a probabilidade *a priori*, que espelha a

densidade das ocorrências conhecidas na área de estudo. A distribuição das ocorrências na zona de estudo pode ser visualizada na figura 11.

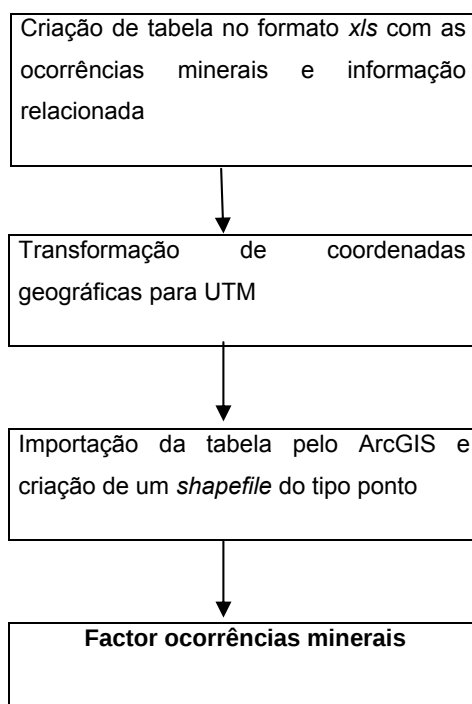


Figura 11 -Fluxograma do factor ocorrências minerais

4.4-Factor geofísico

Há uma enorme escassez de dados geofísicos, neste caso relativos a magnetometria. Tanto os relatórios do Ministério da Indústria Geologia e Minas, como os relatórios da Ferrangol, não fornecem dados de levantamentos magnéticos realizados na área da Jamba ao longo dos anos. O único registo encontrado no momento com estes dados é o trabalho publicado por Vaquero e Trigo (2006) que contem poucas zonas amostradas.

4.5- Factor geoquímico

A informação para compilação deste factor foi retirada de relatórios internos do Ministério da Indústria Geologia e Minas. Foram retirados os dados relativos ao teor de ferro em percentagem, totalizando 360 amostras espalhadas pela zona de estudo. O pré-processamento consistiu na

conversão para o formato digital, gerando uma tabela e estes dados foram convertidos por técnicas interpolativas, geraram o factor geoquímico.

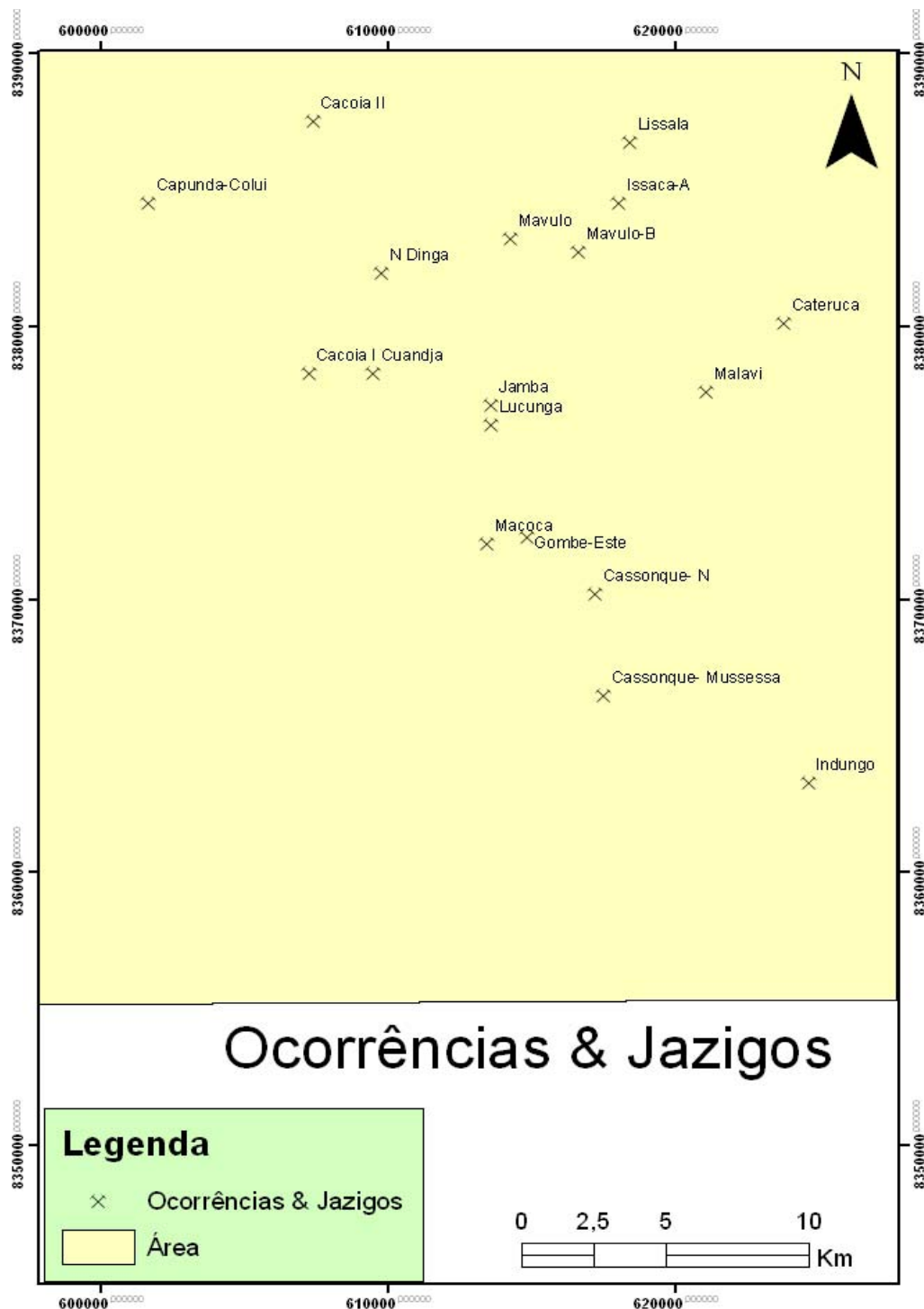


Figura 12. Distribuição das ocorrências minerais

A figura 13 que é resultado de interpolação pelo método *Inverse Distance Weighting (IDW)* em SIG representa o factor geoquímico.

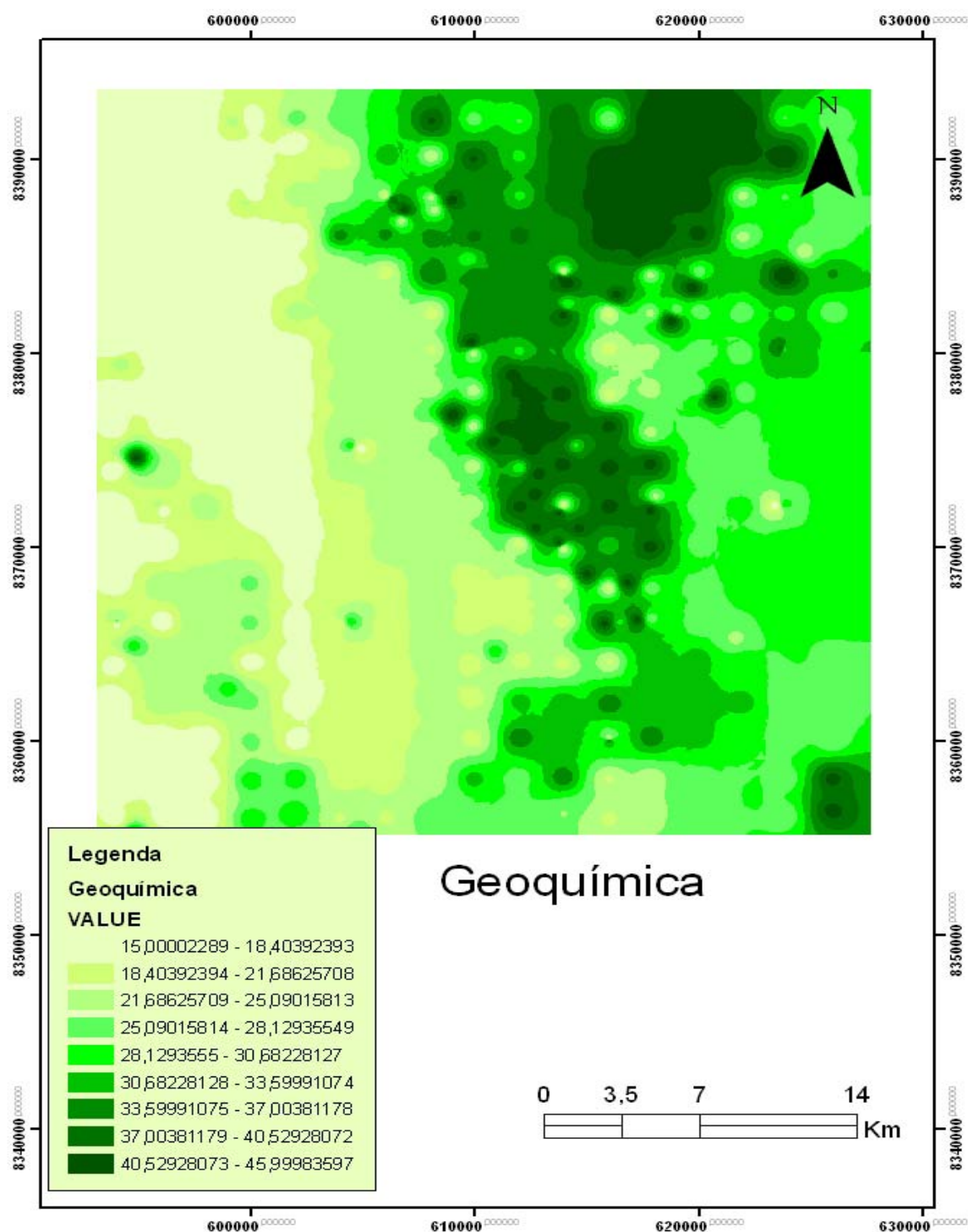


Figura13. Mapa de anomalias geoquímicas da área de estudo.

4.6- Factor geológico

O factor geológico foi seleccionado do mapa geológico de Angola, no formato digital no tipo *shapefile*, neste extraímos as regiões com rochas formadas durante o Proterozóico, pois os minérios hematíticos da Jamba foram formados neste período, e as áreas correspondentes as formações litológicas da Jamba e Cuandja. Os dois temas que aparecem na figura 14 mais abaixo, foram combinados para formar um único factor que neste nosso estudo denomina-se factor geológico.

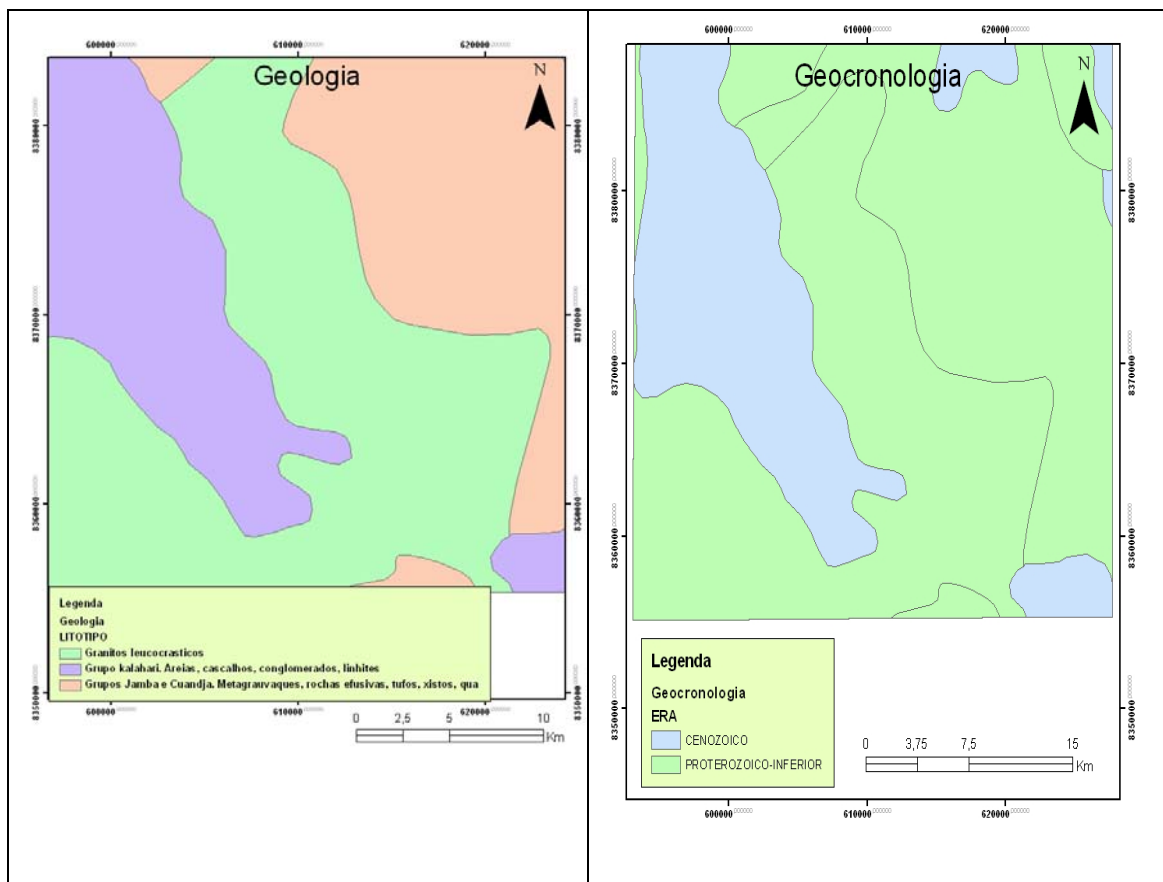


Figura 14. Mapa geológico e mapa geocronológico. Fonte: adaptado de Araújo et al 2001

4.7-Factor alteração hidrotermal

Este factor é derivado de um conjunto de operações sobre a imagem de satélite, neste caso uma Landsat adquirida para o estudo. Estas operações baseiam-se essencialmente na análise e interpretação de imagens de satélite com base nas técnicas de detecção remota.

A detecção remota é a ciência que trata dos métodos de observação da Terra por sensores instalados em satélites artificiais ou aviões (Fonseca e Fernandes, 2004). As aplicações da detecção remota por satélite são de grande utilidade na gestão de recursos naturais e, neste trabalho destacam-se as aplicações na área mineral.

A detecção remota e os SIG apresentam-se como técnicas que nos dias que correm já provaram ser excelentes na gestão mineral. As suas aplicações nesta área vão desde a demarcação dos contornos litológicas, falhas e das províncias minerais, detecção de zonas de alteração hidrotermal, cadastro da propriedade mineral, estabilidade das estruturas geomorfológicas na mina, oferta de dados geológicos de baixo custo (Sabins, 1986 citado por Ott et al, 2006).

Para Legg (1994) em todas etapas de um programa de exploração mineral, a detecção remota é uma mais-valia quando utilizada em conjunção de outras técnicas tradicionais.

4.7.1- Características do satélite *Landsat*

O programa *Landsat* teve o seu início em 1972, na altura designado *ERTS1*, visando a aquisição de imagens multi-espectrais da superfície do nosso planeta. Desde o seu lançamento até hoje foram lançados 7 satélites, que inicialmente apresentavam resolução espacial de 80metros e hoje as resoluções espaciais atingem os 15 metros com a inclusão da banda pancromática.

Actualmente nos estudos de pesquisa mineral são utilizadas cenas do *Landsat 5 (TM)* e *7 (ETM)*, já que mostraram resultados adequados há estes tipos de estudos, um grande numero de exemplos são apresentados por Sabins, (1999).

Caracterização das bandas do sensor *ETM* do satélite *Landsat*, aparecem na tabela 7 abaixo.

Bandas	Resolução espectral (µm)	Resolução espacial (m)	Resolução temporal (dias)
Banda 1	0.45 - 0.53	30	16
Banda 2	0.52 - 0.61	30	16
Banda 3	0.63 - 0.69	30	16
Banda 4	0.75 - 0.90	30	16
Banda 5	1.55 - 1.75	30	16
Banda 6	10.4 - 12.5	60	16
Banda 7	2.09 - 2.35	30	16
Pancromática	0.52 – 0.90	15	16

Tabela 7. Características das bandas do *Landsat ETM*

Os dados usados nesta fase são provenientes do satélite americano *Landsat ETM*, adquirido no sítio do *GLCF*, da *Universidade de Maryland* datada de 28 de Dezembro de 2001, cujas características são as seguintes:

- Satélite: Landsat
- Sensor: ETM
- Identificação no GLCF **036-822**
- WRS-P/R: Path-180; Row-070
- Produtor: Earthsat
- Formato: GeoTIFF
- Localização: Angola
- Bandas utilizadas: 6 (excluídas as bandas 6 e 8)
- Sistema de coordenadas: UTM WGS84 zona 33S.

Durante as etapas de processamento dos dados do satélite Landsat, para análise visual e selecção das zonas de alteração hidrotermal, os seguintes procedimentos foram utilizados:

- a) Elaboração da composição colorida RGB
- b) Correccção do efeito da atmosfera
- c) Razão de bandas
- d) Análise de componentes principais
- e) Extracção das zonas de alteração hidrotermal.

A composição colorida escolhida nesta etapa foi a RGB 742. Para Rigol e Chica-Olmo (1998) as composições RGB 541, 742, 475 são bastante úteis em estudos geológicos. Na figura 15 temos uma composição 742 da área de estudo.



Figura15. Composição colorida 742 da área de estudo

A correcção do efeito da atmosfera é uma operação muito útil para eliminação da dispersão da radiação, produção de imagens de grande qualidade, isto é maior clareza e intensidade, o que permite uma análise

mais fiável das rochas e outros objectos. Na figura 16 apresenta-se uma imagem corrigida do efeito atmosférico.

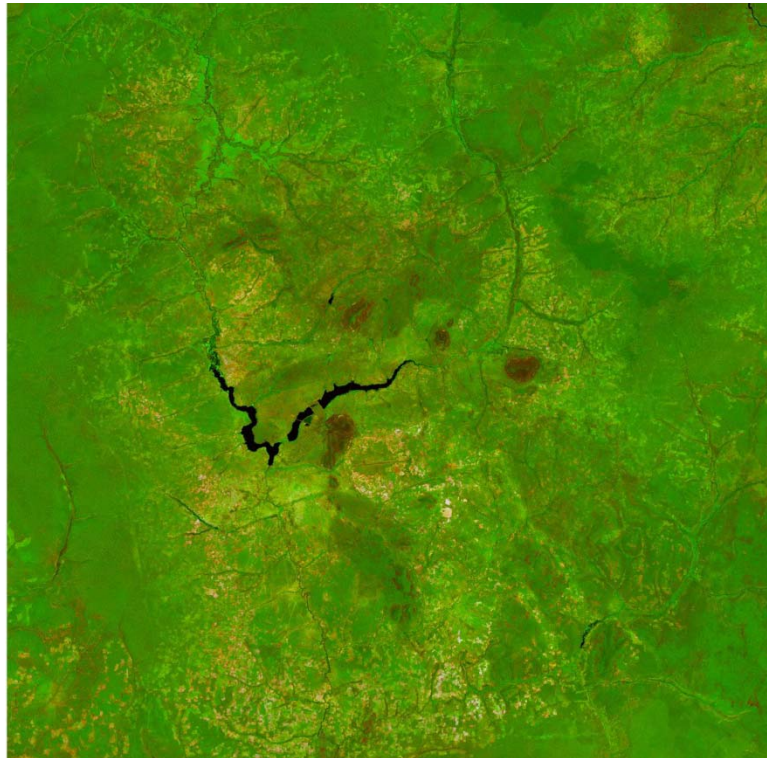


Figura 16. Imagem sem efeito da atmosfera

A razão de bandas é uma técnica também muito utilizada no reconhecimento de zonas de alteração hidrotermal. A razão de bandas Landsat 3/1 é chamada *iron ratio* por ser muito empregue na discriminação de zonas minerais formadas de óxidos de ferro encontrados à superfície terrestre.

Comparativamente às composições coloridas em RGB normais, as composições com base na razão de bandas melhoram em grande medida a detecção de alguns minerais (Ott et al, 2006; Warner e Campagna, 2009). São muito utilizadas em pesquisa mineral os rácios de bandas 3/1; 5/7; 4/3; 5/4.

Alguns minerais de detecção possível em cenas Landsat usando a razão de bandas estão resumidos na tabela 8 abaixo:

Razão (Bandas)	Material tipicamente reconhecível	Exemplo de mineral
5/7	Minerais argilosos	Caolinite
5/4	Minerais ferrosos	Jasorite
3/1	Óxidos de ferro	Hematite

Tabela 8. Razão de bandas usadas na detecção de minerais. Fonte: Warner e Campagna, 2009.

Nesta razão de bandas é possível detectar zonas de alteração hidrotermal, por as mesmas aparecerem mais claras do que o resto da imagem. A razão de bandas 3/1 apresentada na figura 17, torna possível visualizar em tons claros as zonas com ocorrências de ferro.

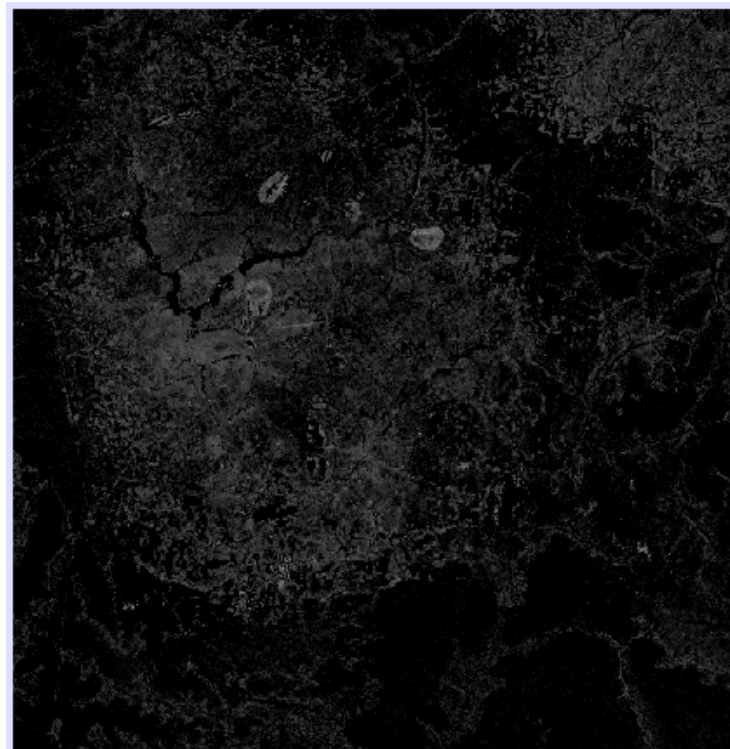


Figura17. Razão de bandas 3/1

Análise de Componentes Principais (ACP) também foi empregue neste trabalho, para diminuir problemas com as bandas bastante correlacionadas do Landsat. A enorme correlação entre as bandas do satélite que causa grande redundância nos dados, dificulta muitas vezes a detecção correcta dos elementos encontrados a superfície terrestre.

ACP visa essencialmente a redução da redundância nos dados, pela criação de novas bandas em que grande parte da informação é concentrada nas primeiras componentes que contêm grande parte da variância. Deste modo a CP1 retêm informação do albedo e da topografia, a CP2 retêm informação da topografia e litologia, as CP3 e CP4, informação litológica e as restantes componentes apresentam informação com muito ruído.

A tabela 9 apresentada a seguir mostra a percentagem da variância em cada componente principal e o número de valores próprios (*eigenvalues*) para a área de estudo.

COMPONENTE	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
% Variância	96.328.764	3.055.875	0.361544	0.131329	0.081828	0.040663
eigenvalues	3.665.850.625	116.293.193	13.758.774	4.997.805	3.114.015	1.547.452

Tabela 8. Variâncias e valores próprios nas componentes principais

ACP é largamente usada para mapeamento de zonas de alteração hidrotermal em regiões com ocorrências de minerais metálicos, sendo utilizada para realçar diferenças espectrais entre as rochas (Soe e outros, 2005).

As composições coloridas realizadas com base nas componentes principais apresentam resultados com colorações mais vivas, o que permite identificar e discriminar melhor os elementos cobertos pela cena do satélite. A figura 18 que a seguir apresentamos mostra uma composição colorida RGB onde empregamos as componentes principais CP1 CP2 CP4 estado bem visíveis as zonas de alteração com jazigos de ferro em tons esverdeados.



Figura18. Composição colorida resultante da ACP 124

O mapeamento das rochas de acordo com as características espectrais é feito de acordo com os valores apresentados pela curva de reflectância espectral da hematite, mostrada na figura 19 que apresenta os valores mais elevados entre 0,7-1.0 μ m, com base nos dados do *USGS spectral libraries* e do *Jet Propulsion Laboratory da NASA*. A figura 20 é um mapa binário que surge como resultado de uma operação de extracção sobre a imagem em que o número 1 representa as áreas com hematite com cor vermelha e o zero representa outras zonas.

Na etapa final recorreu-se a extracção das zonas de alteração hidrotermal correspondentes as ocorrências de ferro superficiais, por vectorização criamos novos polígonos com base nas características espectrais do minério de ferro apresentadas na imagem da figura 19.

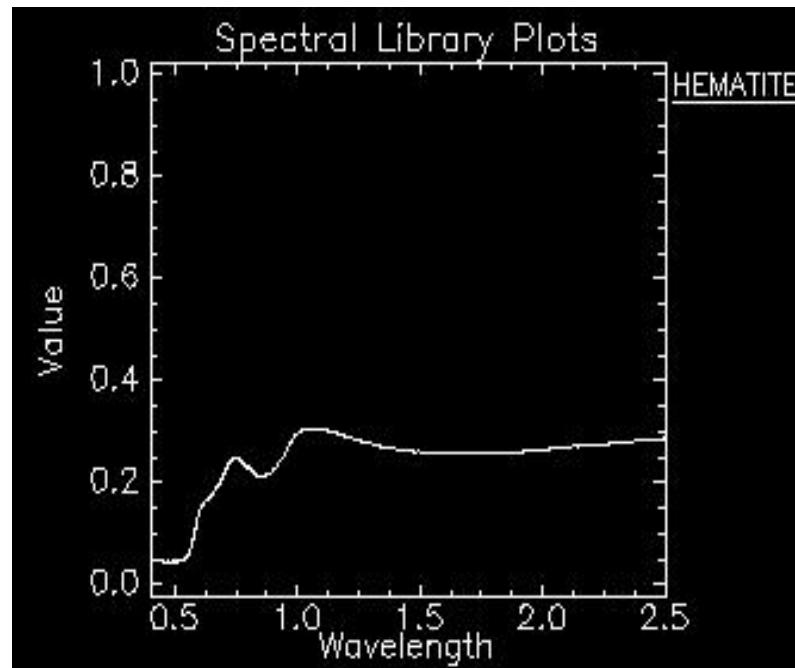


Figura 19 Curva de reflectância espectral da Hematite

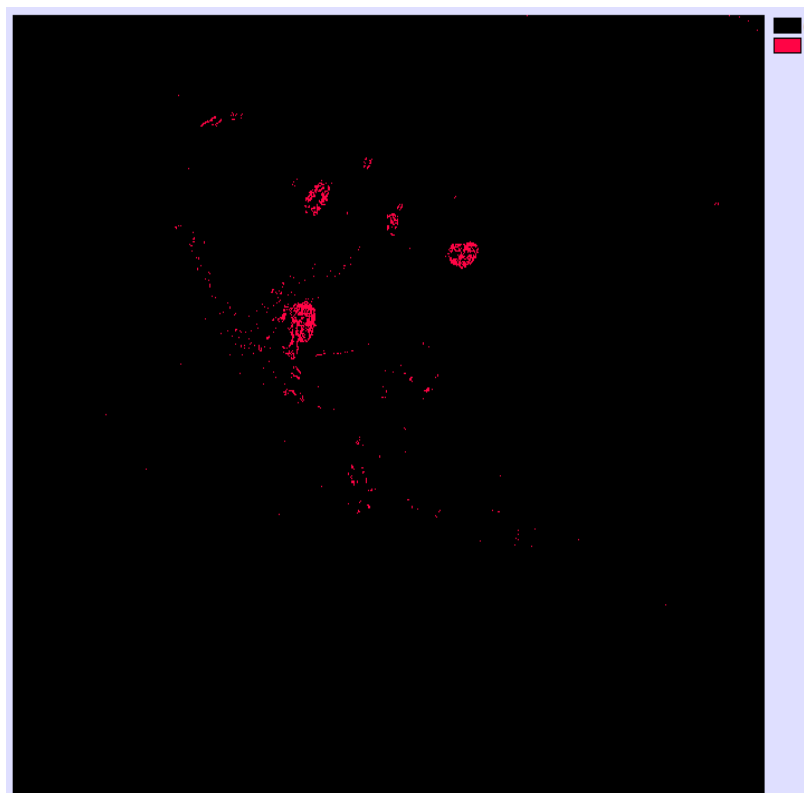


Figura 20. Representação das zonas de alteração hidrotermal

4.8-Integração dos dados pelo método dos pesos de evidência

A integração dos dados ou seja, das evidências para geração do mapa de aptidão final foi feita nesta fase com ajuda da metodologia de pesos de evidência do inglês *Weights of Evidence (WofE)*.

O *WofE* é um método dirigido pelos dados muito utilizado em estudos de mapeamento da aptidão mineral, como confirmam os trabalhos de (Bonham-Carter 1994; Carranza, 2009; Duke e Steele 2010; Fallon et al 2010; Porwal et al 2010; Hyun-Joo e Saro, 2010).

O *WofE* é um método quantitativo que utiliza uma função matemática para combinar as evidências ou mapas de evidências e assim prognosticar a ocorrência de objectos e sua distribuição (Franca-Rocha et al 2000). Embora tenha sido utilizado inicialmente para aplicações no ramo da medicina, a partir dos anos 80 passou a ser usado nos mapeamentos de minerais.

Em termos simples pode-se dizer que o mapeamento é feito com base na atribuição de pesos as várias evidências, de acordo com a relação espacial que as mesmas possuem com os depósitos de ocorrências conhecidas.

O *WofE* utiliza as ocorrências conhecidas como dados treino do modelo para criar mapas a partir de pesos dos *layers* de *input*, com a utilização *ArcSDM* em ambiente *ArcView*, seguindo as etapas que se seguem:

Delimitação da área de estudo

A definição e delimitação da área de estudo deve ser feita no início do processo de integração, porque é muito importante no *WofE*, por ser utilizada durante o cálculo dos pesos e da probabilidade *a priori*. A área de estudo possui uma área de aproximadamente 1345Km².

Ocorrências conhecidas e probabilidade *a priori*

As ocorrências são os locais de treino do modelo e são usadas para calcular a probabilidade *a priori*, o peso de cada tema de evidência e a probabilidade posterior do tema gerado.

A probabilidade *a priori* é calculada dividindo o total de células contendo pontos de treino pelo total da área de estudo, independentemente da evidência em análise, ou seja a probabilidade *a priori* é a proporção de ocorrências conhecidas na área de estudo. Na área de estudo existem 18 ocorrências conhecidas que dão uma probabilidade *a priori* igual 0.1358.

Os temas de evidência

Constituem o conjunto de temas espaciais contínuos no formato *grid*, que estão associados a localização e distribuição de ocorrências conhecidas. Os temas de evidência podem ser *layers* contendo informação geológica, geofísica, geoquímica ou outra que seja importante na predição de áreas minerais. Os temas usados no presente estudo apresentam-se na figura 21 mais a baixo, onde temos (tema A geoquímica, B geologia, C alteração hidrotermal, D ocorrências, E geocronologia e F é a área de estudo).

O peso das evidências

Estes são calculados para cada tema de evidência utilizado pelo modelo, com base na presença ou ausência de ocorrências conhecidas na área de estudo. Assim a lógica utilizada para o cálculo dos pesos é a seguinte:

- Área ocupada pela variável X
- Totalidade da área de estudo
- Número de ocorrências de ferro presentes na área coberta pela variável X
- Número total de ocorrências de ferro existentes.

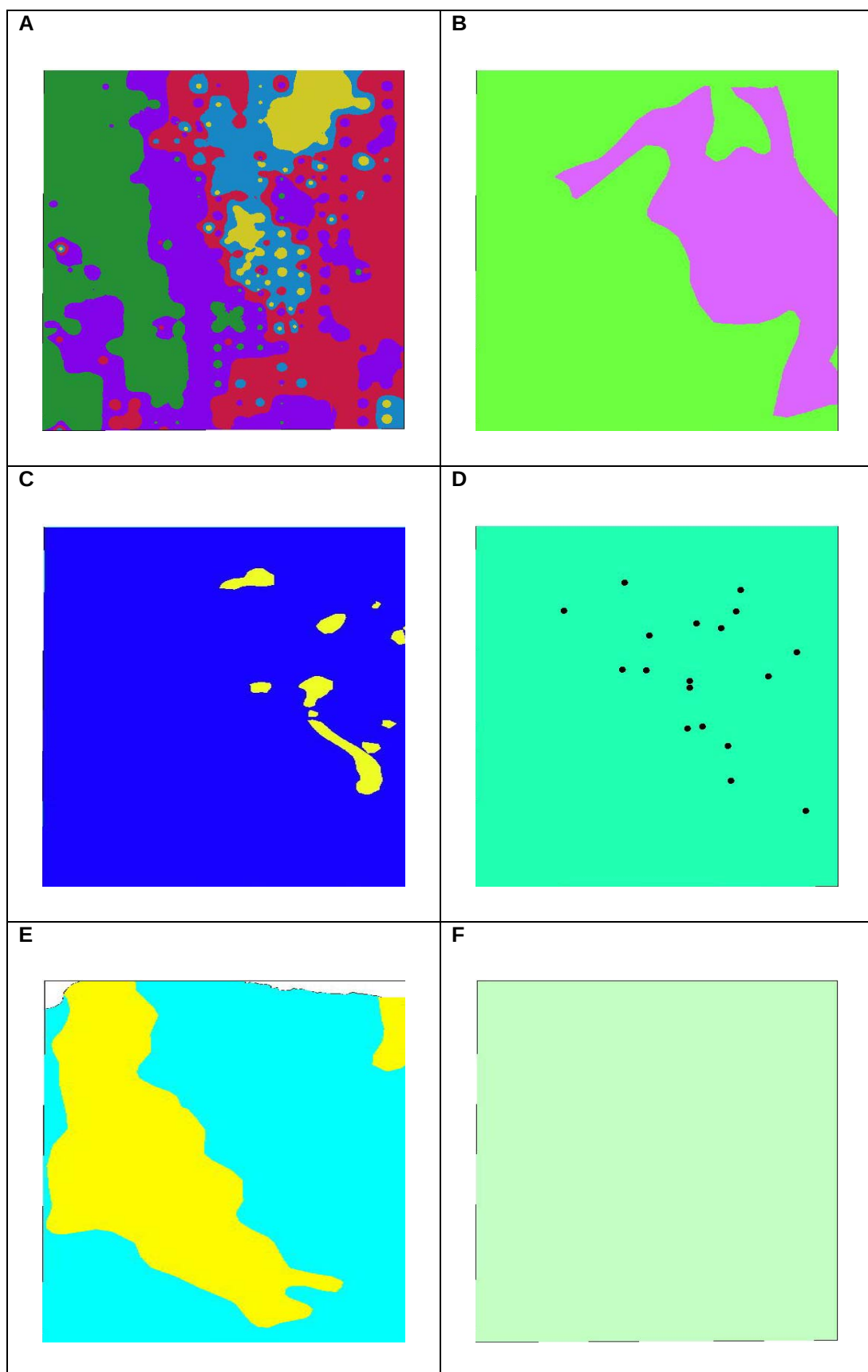


Figura 21. Temas de evidência

Os pesos podem ser positivos negativos ou nulos, sendo o peso nulo, aquele igual a zero que espelha a não existência de associação entre o tema de evidência em análise e os dados de treino (ocorrências conhecidas).

Um peso positivo (W^+) é calculado para áreas que tenham mais pontos do que o esperado, e um ponto negativo (W^-) será aquele correspondente as áreas que possuam menos pontos do que o esperado (Raines, et al 2000; Arthur et al 2005).

Expressão 1)
$$W^+ = \ln \frac{P(B|D)}{P(B|\bar{D})}$$

Expressão 2)
$$W^- = \ln \frac{P(\bar{B}|D)}{P(\bar{B}|\bar{D})}$$

Onde:

W^+ - Peso positivo

W^- - Peso negativo

ln – Logaritmo natural

P – Probabilidade

B- Ocorrências de ferro existentes

D- Ausência de ocorrências de ferro

–

B- Classe de variável condicionante

D- Ausência de variável condicionante

Para Raines et al (2000) a redução do número de classes, para apenas duas classes melhora estatisticamente a robustez dos pesos, se bem que o *WofE* funcione com temas de evidências multiclassas. Assim três abordagens

durante o cálculo dos pesos são possíveis, sendo a categórica, a cumulativa ascendente e a cumulativa descendente. A abordagem categórica é utilizada no cálculo de pesos onde não há ordenação, estando em causa apenas a presença ou ausência da evidência. A cumulativa ascendente é usada na análise de proximidade, onde as zonas mais próximas dos locais de treino são mais preditivas do que as demais e, a cumulativa descendente é usada de forma oposta.

Probabilidade Posterior

Esta resulta de um conjunto de operações estatísticas, e de sobreposição de temas de evidência em que o mapa resultante é na verdade o mapa de aptidão mineral para a região estudada. Neste mapa nota-se que para a definição da aptidão teve grande impacto a geoquímica que foi reclassificada para 5 classes (Cumulativa ascendente), onde a classe 5 coincide com as zonas de maior aptidão. A tabela 10 mostra os resultados da combinação das evidências usadas na geração do mapa final onde destacamos o menor valor para a probabilidade posterior (*Value 6*) e maior (*Value 20*). A probabilidade posterior é um indicador quantitativo da presença do minério de ferro na região estudada e pode ser visualizada na figura 22 que é apresentada a seguir. As regiões com os valores mais elevados, isto é com probabilidade posterior maior estão representadas a vermelho e as de menor valor representadas em tom de azul mais escuro.

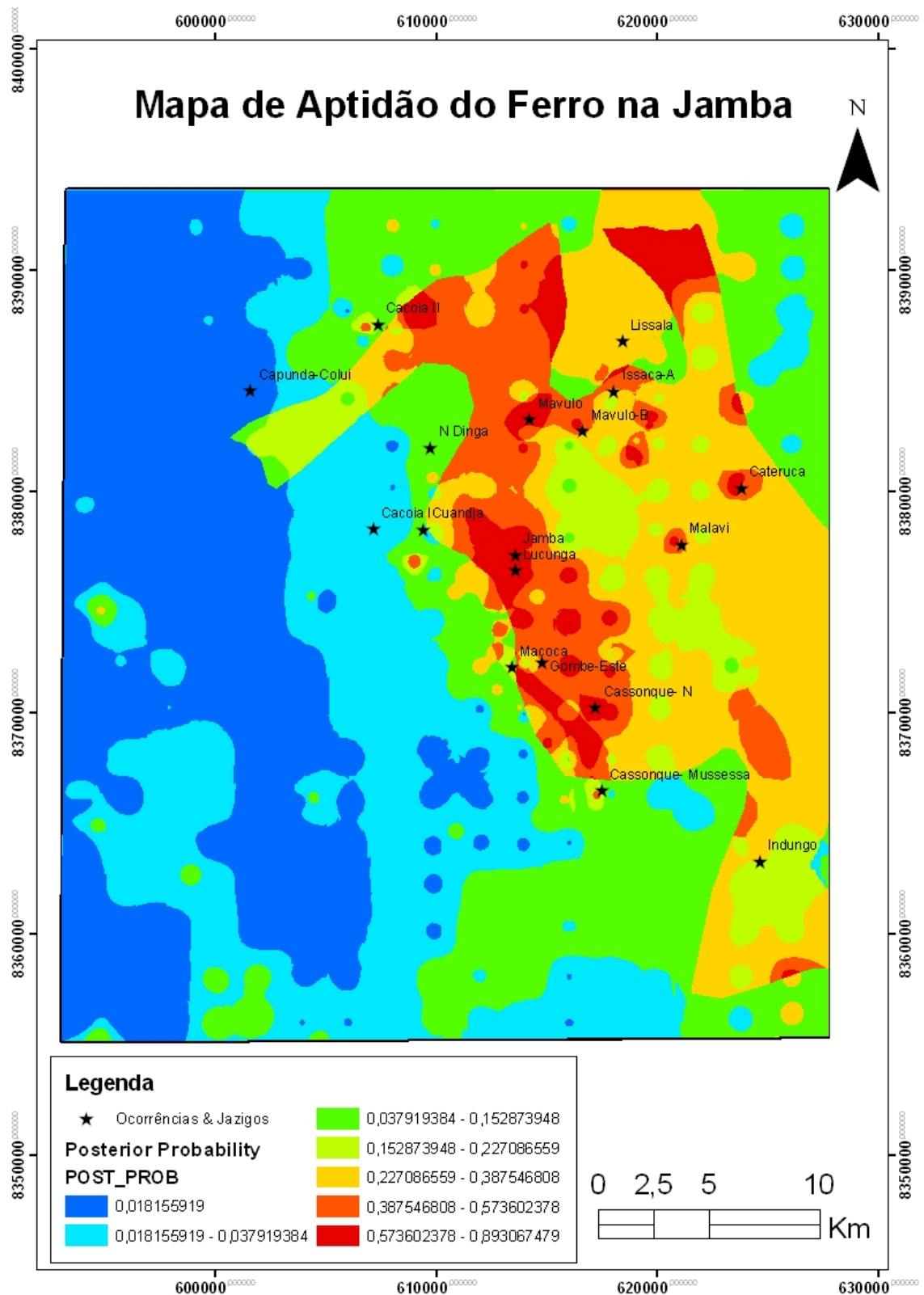


Figura 22. Mapa de probabilidade posterior

VALUE	COUNT	GEOQ	GEOL	ZAHT	TRAININGPOINTS	AREA_SQM	POST_PROB
1	199	1	0	-99	0	497500	0,0378246
2	87	2	0	-99	0	217500	0,0773124
3	227	3	0	-99	0	567500	0,152874
4	140	4	0	-99	0	350000	0,210513
5	90	5	0	-99	0	225000	0,528385
6	140345	1	0	0	1	350862500	0,0181559
7	115309	2	0	0	2	288272500	0,0379194
8	80299	3	0	0	0	200747500	0,0782449
9	21819	4	0	0	1	54547500	0,111448
10	16860	5	0	0	1	42150000	0,345125
11	32592	4	1	0	3	81480000	0,483197
12	66994	3	1	0	1	167485000	0,387547
13	9540	5	1	0	0	23850000	0,7971
14	1532	4	0	1	2	3830000	0,210513
15	2083	3	0	1	1	5207500	0,152874
16	4196	4	1	1	4	10490000	0,665291
17	27811	2	1	0	1	69527500	0,227087
18	119	2	0	1	0	297500	0,0773124
19	5563	3	1	1	0	13907500	0,573602
20	1876	5	1	1	1	4690000	0,893067
21	408	2	1	1	0	1020000	0,384466
22	917	5	0	1	0	2292500	0,528385
23	1317	1	1	0	0	3292500	0,121145
24	13	1	1	1	0	32500	0,226631

Tabela 10. Tabela dos valores da probabilidade posterior

Resultante de uma operação de reclassificação, a figura 23 mostra as zonas classificadas desde aptidão muito baixa a elevada sendo as zonas a vermelho aquelas onde há maior aptidão de encontrar ferro.

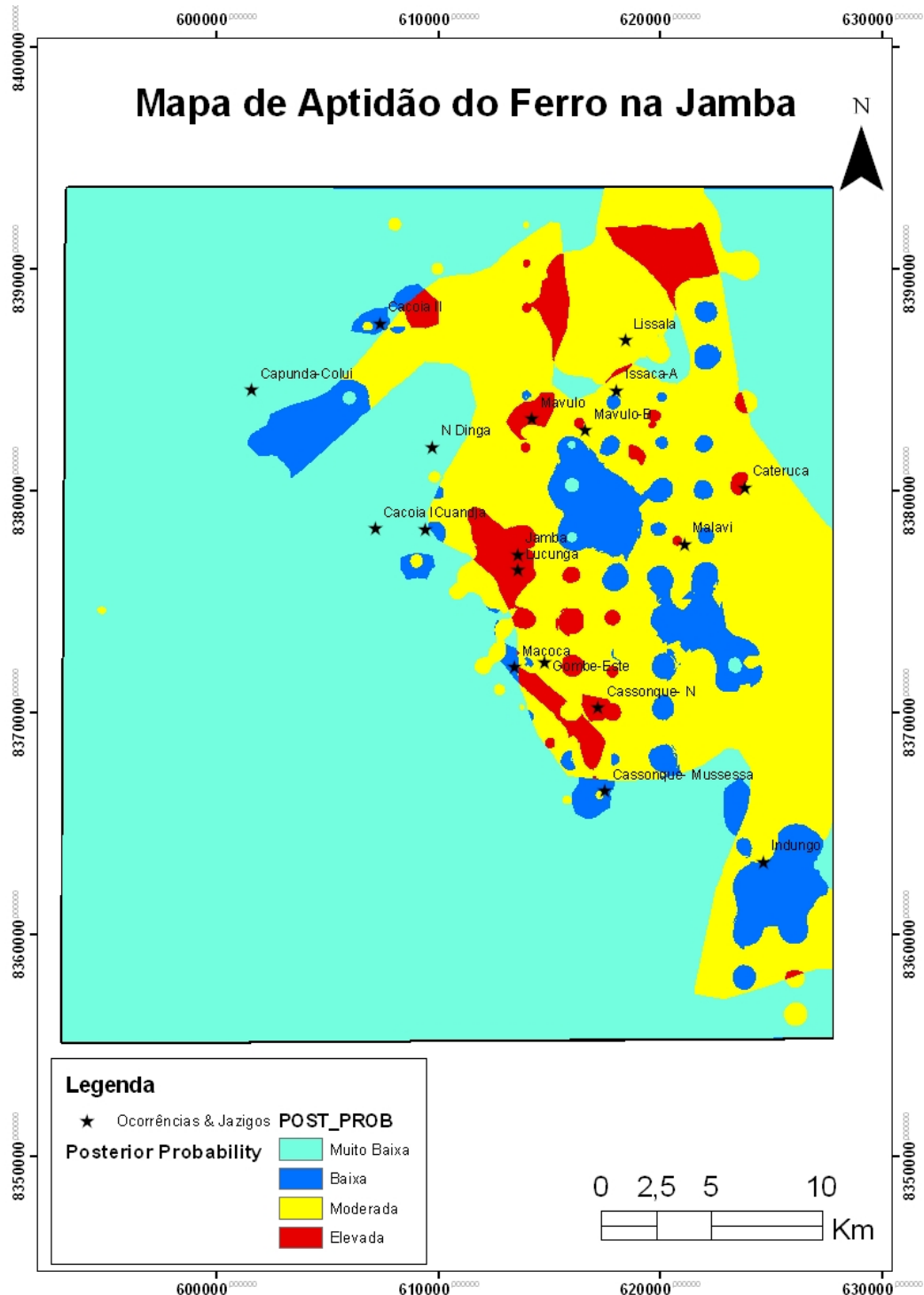


Figura 23. Mapa de aptidão final

A integração de dados em SIG pelo método dos pesos de evidência é muito útil na pesquisa mineral. Neste estudo em particular, o método dos pesos de

evidência tornou possível a combinação de evidências como geologia (GEOL), geoquímica (GEOQ) e as zonas de alteração hidrotermal (ZAHT), com base em operações de análise espacial, tendo resultado daí o mapa de aptidão de ferro para a região da Jamba em Angola.

As expectativas, de forma geral foram cumpridas com esta integração de dados, já que grande maioria dos pontos de controlo, que são as ocorrências conhecidas, coincidem com as zonas de probabilidade posterior mais elevadas.

As zonas de maior aptidão localizam-se na zona central e nordeste da área de estudo.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Pode-se concluir que a exploração do minério de ferro no mundo não é uma actividade recente, e a utilidade deste mineral para a Humanidade é notória. Em Angola o exercício de exploração começa no século XX, ainda durante a administração colonial e, é nesta fase que se começa a elaborar a cartografia geológica de Angola. Hoje ainda não se conhece de forma cabal o potencial mineral do país, pelo que há uma grande necessidade de aquisição desse conhecimento.

Os métodos de exploração mineral em combinação com os SIG são uma excelente alternativa para o conhecimento geológico de Angola, pois os desenvolvimentos no sector das novas tecnologias têm permitido uma maior adequação dos métodos de obtenção de informação e gestão do espaço.

A gestão mineral é uma área que muito tem beneficiado dos desenvolvimentos dos SIG e da detecção remota. Os SIG quando usados na gestão mineral como recurso a abordagens e modelos especializados, permitem a caracterização e até a descoberta de novos jazigos e ocorrências minerais.

A metodologia aplicada na integração de dados em SIG foi o método dos pesos de evidência que para este trabalho mostrou ser muito útil. Neste estudo em particular, o método dos pesos de evidência tornou possível a combinação de evidências como geologia, geoquímica e as zonas de alteração hidrotermal, com base em operações de análise espacial, em ambiente *ArcSDM* tendo resultado daí o mapa de aptidão mineral de ferro para a região da Jamba em Angola.

Limitações do estudo

Como a maioria dos trabalhos de investigação, este também tem algumas limitações que prendem-se com a qualidade dos dados utilizados. Pode-se referir os factores como a escala e a idade dos mapas utilizados como

aspectos que deverão ser melhorados no futuro. A escala do mapa geológico é de 1:1000000, esta escala é muito pequena e generalista, pois para um conhecimento mais apurado da região seriam necessários mapas com escalas maiores. A idade dos dados é outra limitação, pois a bibliografia e mesmo o levantamento geoquímico e das ocorrências foi feito na década de 60 e 70.

O factor geofísico foi referido, mas não foi possível usá-lo durante a integração, porque o acesso aos dados geofísico durante a investigação.

Trabalhos futuros

Como grande parte dos trabalhos de investigação, muitas questões ficam por estudar, devido a diversidade metodológica existente, diversidade bibliográfica e os desafios impostos pelo contexto institucional e ambiental.

Para trabalhos futuros seria muito útil a utilização do método dos pesos de evidência e o de lógica *fuzzy*, para se estabelecerem comparações entre os resultados.

O emprego do método dos pesos de evidência pode ser muito útil para estudos noutras regiões de Angola, na pesquisa de ferro e outros minerais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albaréde, F; 2003. *Geochemical an Introduction*. Cambridge University Press.

Araújo, A.G; Perevalov, O.V; Guimarães, F.R; Kondratiev, A.I; Tselikovski,A.F; Khódriev,V.L; Polskoi.F.R; Agueev,Y.I; Voinovski,A.S; Sunda,P; Joaquim,A; 2001. *Catálogo De Recursos Minerais De Angola*. Instituto Geológico de Angola.

Arthur, J.D; Baker, A.E; Cichon, J.R; Wood, A.R; Rudin, A; 2005. *Florida Aquifer Vulnerability Assessment (FAVA): Contamination Potential of Florida's Principal Aquifer Systems*. Division of Water Resource Management Florida Department of Environmental Protection.

Aronoff, S; 1989. *Geographic Information Systems: A Management Perspective*. WDL Publications.

Banco de Angola; 1973. *Angola Economic And Financial Survey*. Annual Report.

Bankey, V; Pitkin, J.A; 2000. Geophysical Studies in Bankey, V; Soulliere,S.J; Toth,M.I (Editors) *Mineral Resource Potential and Geology of the Routt National Forest and the Middle Park Ranger District of the Arapaho National Forest*. Colorado U.S Departement of the Interior.

Bilim, F; 2007; *Investigations into the tectonic lineaments and thermal structure of Kutahya–Denizli region, western Anatolia, from using aeromagnetic, gravity and seismological data*. Physics of the Earth and Planetary Interiors 165 (2007) 135–146.

Billa, M; Cassard,D;. Lips, A.L.W ; Bouchot, V; Tourliere,B; Stein,G; Guillou-Frottier,L; 2004.*Predicting gold-rich epithermal and porphyry systems in the central Andes with a continental-scale metallogenic GIS*. Ore Geology Reviews 25 (2004) 39– 67.

Bonham-Carter ,G.F; Agterberg ,F.P; 1988. *Arc-WofE: a GIS tool for statistical integration of mineral exploration datasets*. Geological Survey of Canada.

Bonham-Carter,G.F;1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists Modelling With GIS*. Volume 13,Pergamon.

Bonham-Carter, G.F. 1997. *GIS Methods for Integrating Exploration Data Sets*. Geological Survey of Canada, Ottawa, Ontario, Canada.

Brown, W.M; Gedeon, T.D; Groves, D.I; Barnes, R.G; 2000. *Artificial neural networks: a new method for mineral prospectivity mapping*. Australian Journal of Earth Sciences (2000) 47, 757–770. International Journal of Remote Sensing.

Burrough,P.A; McDonnell, R.A ; 1998. *Principles of Geographical Information Systems. Spatial Information Systems and Geostatistics*. Oxford University Press.

Calazans,P.P; Domingues;A,L; 2007. *Implantação e funcionalidades de um sistema de informação geográfica mineral na Companhia Vale do Rio Doce – CVRD*. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 1979-1986.

Carranza, E.J.M; van Ruitenbeek, F.J.A; Hecker, C; van der Meijde,M; van der Meer, F.D; 2008. *Knowledge-guided data-driven evidential belief modeling of mineral prospectivity in Cabo de Gata, SE Spain*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 10 (2008) 374–387.

Carranza, E.J.M; 2008. *Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS*. Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry, vol. 11, Elsevier.

Carranza, E.J.M; Hale,M; Faassen, C ; 2008. *Selection of coherent deposit-type locations and their application in data-driven mineral prospectivity mapping*. Ore Geology Reviews 33 (2008) 536–558.

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 35 (2009) 383–400.

Carranza, E.J.M; Sadeghi, M; 2010. *Predictive mapping of prospectivity and quantitative estimation of undiscovered VMS deposits in Skellefte district (Sweden)* Ore Geology Reviews. doi: 10.1016/j.oregeorev.2010.02.003.

Cooper, G.R.J, 2006; *Interpreting potential field data using continuous wavelet transforms of their horizontal derivatives* Computers & Geosciences 32 (2006) 984–992.

Coppock, J.T; Rhind, D.W; 1991. *The History of GIS*. In Maguire, D.J; Goodchild, M.F; Rhind, D.W (Editors) Geographical Information Systems: Principles and Applications. Longmans Publishers, London.

Cox, D.P; Singer, D.A(Eds); 1986. *Mineral Deposit Models*. U.S Department of The Interior, U.S Geological Survey, Buletin 1693.

Christie,T ;Brathwaite, B; 2006. *Discovery and Origin of Names. Mineral Commodity Report 15- Iron*. Institute of Geological and Nuclear Sciences Ltd New Zealand.

Christmann, P; Arvanitidis, N; Martins, L; Recoché, G; Solar,S; 2007 *Towards the Sustainable Use of Mineral Resources: A European Geological Surveys Perspective*. Minerals & Energy - Raw Materials Report.

Closs, L.G; 1997. *Exploration Geochemistry: Expanding Contributions to Mineral Resource Development*. Department of Geology and Geological Engineering, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, U.S.A.

Curtis, A; Wood, R; 2004. *Geological prior information: informing science and engineering* Edition: illustrated Edição de Geological Society, ISBN 1862391718, 9781862391710.

Chica-Olmo, M; Abarca, F; Rigol,J.P; 2002. *Development of a Decision Support System based on remote sensing and GIS techniques for gold-rich area identification in SE Spain*. International Journal of Remote Sensing, Volume 23, Issue 22 November 2002 , pages 4801 – 4814.

Chrisman, N.R; 1999. *What Does GIS Mean?* Transactions in GIS, 3 (2), 175-186.

Davino, A; 1974. *Estudos sobre a prospecção magnetométrica das ocorrências de Ferro da faixa nova Era-Itamarandiba Minas Gerais*. Boletim IG, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia Económica e Geofísica Aplicada. USP, V.5.1-16 Tese de Doutorado N° 021.

D'Ercole, C; Groves, D.I; Knox-Robinson, C.M; 2000. *Using fuzzy logic in a Geographic Information System environment to enhance conceptually based prospectivity analysis of Mississippi Valley-type mineralization*. Australian Journal of Earth Sciences.

Duke, C; Steele, J; 2010. *Geology and lithic procurement in Upper palaeolithic Europe: a weights-of-evidence based GIS model of lithic resource potential*. Journal of Archaeological Science. Volume 37, Issue 4, April 2010, Pages 813-824.

El-Sadek, M.A; 2009. *Radiospectrometric and magnetic signatures of a gold mine in Egypt*. Journal of Applied Geophysics 67 (2009) 34–43.

Fallon, M; Guj, P; Porwal, A; 2010. *Exploration Value and Undiscovered Gold Endowment in a Mature Gold Camp: Case Study of the Plutonic Marymia Greenstone Belt, Western Australia*. Australian Institute of Geoscientists
AIG NEWS Quarterly Newsletter No 99 February 2010.

Faulkner, L; Davies, M.B; Fairclough, M.C; 2007. *Predicting iron potential in South Australia: pilot GIS analysis in the Coober Pedy – Mount Woods domains*. MESA Journal 45 June 2007.

Ferrangol; 1997. *Seminário Para o Desenvolvimento Geológico e Mineiro de Angola*. Ministério da Geologia e Minas.

Filippini-Alba, J.M; Crósta, A.P; Oliveira,S.M.B; 2001.*Interpretation Of Surface Geochemical Data And Integration With Geological Maps And Landsat-Tm Images For Mineral Exploration From A Portion Of The Precambrian Of Uruguay*. Revista Brasileira de Geociências. 31(2): 123-130.

Franca-Rocha, W; Bonham-Carter, G.F; Misi, A; 2000. *Estimando a Favorabilidade para recursos minerais na Bacia de Irecê pelos métodos da Lógica Nebulosa e Pesos de evidência*. Sitientibus, Feira de Santana nº22, P.27-54, Jan/Jun.

Fonseca, A.D; Fernandes, J.C; 2004. *Detecção Remota*. Lidel Edições Técnicas.

Foresman, T; 1998. *The History of Geographic Information Systems: Perspectives From The Pioneers*. Upper Saddle River: Prentice Hall.

Gardoll, S.J ; Groves, D.I; Knox-Robinson, C. M; Yun, G.Y; Elliott, N; 2000.

Developing the tools for geological shape analysis, with regional- to local-scale examples from the Kalgoorlie Terrane of Western Australia. International Journal of Remote Sensing.

Gaspar, J.A; 2005. *Cartas e Projecções Cartográficas*. Lidel Edições Técnicas. 3ª Edição.

Gouveia, J.A.C; Moncada, P.C; Monteiro, J.F.A; Neto, M.G.N.M; 1993. *Riquezas Minerais De Angola*. Instituto para a Cooperação Económica. Cooperação Portuguesa.

Godinho, J.S; 1965. *Algumas Considerações Sumárias Sobre as Reservas dos Jazigos de Minério de Ferro, Da Área a Norte de Cassinga*. Direcção Provincial dos Serviços de Geologia e Minas, Província de Angola.

Groves, D.I ; Dunphy,J.M,2000. *Applications of geochronology, geochemistry and GIS to mineral exploration*. Australian Journal of Earth Sciences.

Granchó, N; 2006. *Origem e Evolução Recente dos Sistemas de Informação Geográfica em Portugal*. BonD. Books on Demand, Quimera Editores, Lda 1ª Edição.

Harris, J. R; Wilkinson,L; Heather,K; Fumerton,S; Bernier,M.A; Ayer,J; Dahn, R; 2001.*Application of GIS Processing Techniques for Producing Mineral Prospectivity Maps—A Case Study: Mesothermal Au in the Swayze Greenstone Belt*, Ontario, Canada. Natural Resources Research, Vol. 10, No. 2.

Harris, J.R; Lemkow, D; Jefferson, C; Wright,D; Falck,H; 2008. *Mineral Potential Modelling for the Greater Nahanni Ecosystem Using GIS Based Analytical Methods*. Natural Resources Research, Vol. 17, No. 2.

Hyun-Joo Oh, Saro; L; 2010, *Application of Artificial Neural Network for Gold-Silver Deposits Potential Mapping: A Case Study of Korea*, Natural Resources Research Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) Geoscience Information Department.

Johnson, L.E; 2009. *Geographic Information Systems in Water Resources Engineering*. CRC Press Taylor & Francis Group.

Jordan,C; Zhang ,C; Higgins,A; 2007. *Using GIS and statistics to study influences of geology on probability features of surface soil geochemistry in Northern Ireland*. Journal of Geochemical Exploration 93 (2007) 135–152.

Jorgenson, J.D, 2006. *Challenges Facing the North American Iron Ore Industry* . Open-File Report 2006–1061. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.

Kappler, A; Pasquero, C; Newman, D.K; 2005. *Deposition of banded iron formations by anoxygenic phototrophic Fe(II)-oxidizing bacteria*. Geological Society of America. November 2005; v. 33; no. 11; p. 865–868.

Kis, K.I; Wittmann,G; 1998. *Determination of vertical magnetic anomalies and equivalent layer for the European region from the Magsat measurements*. Journal of Applied Geophysics 39 _1998. 11–24.

Knox-Robinson;C.M; 2000. *Vectorial fuzzy logic: a novel technique for enhanced mineral prospectivity mapping, with reference to the orogenic gold mineralisation potential of the Kalgoorlie Terrane, Western Australia*. Australian Journal of Earth Sciences.

Knox-Robinson,C.M; Wyborn.L.A.I; 1997. *Towards a holistic exploration strategy: Using Geographic Information Systems as a tool to enhance exploration*. Australian Journal of Earth Sciences.

Langel,R.A;Hinze W.J; 1998. *The Magnetic Field of Earths Lithosphere*.Cambrige University Press.

Lapido-Loureiro, F.E; Machado, L; 1972. *Contribuição para o Conhecimento Geológico de uma área de 15000 km2 Correspondente as folhas nºs 359,360,361,380,381 e 382, da Carta Topográfica de Angola, Na Escala de 1:100000*. Instituto de Investigação Científica de Angola.

Lee,H-Jin; Chi,K-Hoon; Park,N. *GIS-based Spatial Fusion using Geochemical Data for Mineral Potential Mapping*. Department of Applied Geology. Pukvong National University. Busan 608-737,Korea.National Geoscience Information Center. KIGAM Daejeon 305-350, Korea.s/d.

Legg, A.C; 1994. *Remote Sensing and Geographic Information Systems, Geological mapping, mineral exploration and mining*. Ellishorwood library of Space science and Space technology. Series in Remote Sensing.

Li, J; Heap, A.D; 2008. *A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists*. Geoscience Australia.

Lillesand,T.M; Kiefer,R.W; Chipman,J.W; 2008. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 6ª Ed John Wiley & Sons.

Longley, P; Goodchild, M.F; Maguire, D.J; Rhind, D.W; 2005.*Geographical information systems and science*.2ª Edição, John Wiley and Sons.

Machado, J.A.R; 2000. *A emergência dos sistemas de informação geográfica na análise e organização do espaço*. Fundação Calouste Gulbenkian e Fundação para Ciência e Tecnologia.

Maus,S; Sazonova, T; Hemant, K; Fairhead,J.D; Ravat, D; 2007.*National Geophysical Data Center candidate for the World Digital Magnetic Anomaly*

Map. Electronic Journal Of The Earth Sciences. Published by AGU and the Geochemical Society, Volume 8, Number 6, ISSN: 1525-2027.

Martins, J.A; 1962. *Minérios de Ferro em Angola*. Junta de Desenvolvimento Industrial, Fundo de Fomento de Produção e Exportação.

Matos, J.L; 2001. *Fundamentos de Informação Geográfica*. Lidel Edições Técnicas, 3ª Edição.

McSween Jr,H.Y; Richarson,S.M; Uhle,M:E; 2003. *Geochemistry: Pathways and Processes*. Columbia University Press, New York. Second Edition.

Mira, J.M.T; 1970. *Nota Sobre os Jazigos de Ferro de Angola*. Direcção Provincial dos Serviços de Geologia e Minas, Província de Angola.

Moreira, F.R.S, Filho, R.A, Câmara, G; 2003. *Modelamento De Dados Geológicos Em Pesquisa Mineral Segundo O Teorema De Bayes*. Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, INPE, p. 895-902.

Neto, M.G.N.M; 1969. *Nota Acerca da Actividade dos Serviços de Geologia e Minas*. Boletim dos Serviços de Geologia e Minas de Angola, Nº 19. Luanda.

Nunes, A.F ;1991. *A investigação Geológico - Mineira em Angola*. Instituto Para a cooperação Económica (ICE) Lisboa.

Nykänen, V; 2008. *Spatial data analysis as a tool for mineral prospectivity mapping*. Academic Dissertation GEOLOGICAL SURVEY OF FINLAND. Espoo.

Ocorrências Minerais, 1965. Direcção Provincial dos Serviços de Geologia e Minas, República Portuguesa.

Ott, N; Kollersberger, T; Tassara, A; 2006. *GIS analyses and favorability mapping of optimized satellite data in northern Chile to improve exploration for copper mineral deposits*. Geosphere. doi: 10.1130/GES00017.1.

Painho, M.O.T; 2006. *A Informação Geográfica, Geografia e a Internet. Um Olhar Sobre a Sociedade e o Território*. In Revista fórum geográfico. Revista Científica e Técnica do IGP. Edição e Propriedade Instituto Geográfico Português. Ano| Nº 1 Outubro 2006.

Partington, G.A; 2000. *Mineral Exploration in the Drummond Basin North Queensland, Using spatial Analysis in a GIS*. Presented at SIRC 2000 – The 12th Annual Colloquium of the Spatial Information Research Centre, University of Otago, Dunedin, New Zealand December 10-13th.

Peter, H.B.J, Bonham-Carter. G, Lynds.T; 2004. *A GIS Mineral Occurrence, Database in Support of a Metallogenic Study of the Slave Province*. Yellowknife Geoscience Forum.

Popp, J.H, 1998. *Geologia Geral*. LTC. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 5ª Edição.

Porwal, A; Gonzalez-Alvarez, I; Markwitz, V; McCuaig, T.C; Mamuse, A; 2010. *Prospectivity weight of evidence and logistic regression modelo f magmatic nickel sulphides in the Yilgarn craton Westwer Australia*. Ore Geology Reviews.

Porwal, A; Carranza, E. J. M ; Hale ,M; 2001. *Extended Weights-of-Evidence Modelling for Predictive Mapping of Base Metal Deposit Potential in Aravalli Province, Western India*. *Exploration and Mining Geology*; October; v. 10; no. 4; p. 273-287; DOI: 10.2113/0100273.

Porwal, A; Carranza, E. J. M; Hale, M; 2003. *Knowledge-driven and Data-driven Fuzzy Models for Predictive Mineral Potential Mapping*. *Natural Resources Research*, Vol. 12, No. 1, March 2003.

Porwal, A; Carranza, E. J. M ; Hale,M; 2005. *Knowledge-driven and Data-driven Fuzzy Models for Predictive Mineral Potential Mapping*. Natural Resources Research, Vol. 14, No. 4, December doi: 10.1007/s11053-006-9005-6.

Quadros, T.F.P; 2000. *Integração de Dados em Ambiente SIG para Mapeamento de Favorabilidade Mineral de Ouro na Ilha Cristalina de Rivera Uruguai*. Tese de Doutorado apresentada na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Quadros,T.F.P; Koppe, J.C; Strieder, A.J; Costa, J.F.C.L; 2006. *Mineral-Potential Mapping: A Comparison of Weights-of-Evidence and Fuzzy Methods*. Natural Resources Research, Vol. 15, No. 1, March 2006 doi: 10.1007/s11053-006-9010-9.

Ravat, D; Wanga, B; Wildermutha, E; Taylor,P.T; 2002. *Gradients in the interpretation of satellite-altitude magnetic data: an example from central Africa*. Journal of Geodynamics 33 (2002) 131–142.

Raines,G.L; Bonham–Carter,G.F; Kemp,L; 2000. *Predictive Probabilistic Modeling Using ArcView GIS*. ArcUser April-June 2000. Esri, Redlands California.

Raines, G.L; Bonham-Carter, G.F; 2007.*Introduction to Special Issue on Spatial Modeling in GIS*. Natural Resources Research, Vol. 16, No. 2.

Rajesh.H.M; 2004. *Application of Remote Sensing and GIS in Mineral Resource Mapping-An overview*. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences volume 99, page 83-103.

Rao, T.G; Naqvi, S.M; 1995. *Geochemistry, Depositional Environment and Tectonic Setting of BIF's of Late Archean Chitradurga Shist Belt, India*. Chemical Geology 121(1995/217-243).

Revista InfoGEO. *Especial Mineração*. Directora Agatha Branco. Editora MundoGEO, Setembro de 2007.

Rigol-Sanchez, J.P; Chica-Olmo, M; Abarca-Hernandez, F; 2003. *Artificial neural networks as a tool for mineral potential mapping with GIS*. Australian Journal of Earth Sciences.

Sabins, F.F; 1999. *Remote sensing for mineral exploration*. Remote Sensing Enterprises, 1724 Celeste Lane, Fullerton, CA 92833, USA. Ore Geology Reviews 14 _1999. 157–183.

Schiowitz,D.S White-W.S Cary.J. *A GIS and Geostatical analysis of la plata mining district*. ESRI User Conference 2008.

Sherman,G.E; 2008. *Desktop GIS: Mapping the Planet With Open Source Tools*. The Pragmatic Bookshelf.

Smith, A.B; Gardoll, S.J; 1997. *Structural analysis in mineral exploration using a Geographic Information Systems -adapted stereographic-projection plotting program*. Australian Journal of Earth Sciences.

Tangestani, M.H; Moore. F; 2001. *Porphyry copper potential mapping using the weights-of-evidence model in a GIS, northern Shahr-e-Babak, Iran*. Australian Journal of Earth Sciences.

Tangestani, M.H; Moore. F; 2003. *Mapping porphyry copper potential with a fuzzy model, northern Shahr-e-Babak, Iran*. Australian Journal of Earth Sciences.

Torrecillas, R.C; 2006. *Sistemas y Análisis de la Información Geográfica. Manual de Autoaprendizagem com ArcGIS*. Coordinador Antonio Moreno Jiménez. Alfaomega Grupo Editor, S.A.

Vaquero, J.M; Trigo, R.M; 2006. *Results of geomagnetic observations in Central Africa by Portuguese explorers during 1877–1885*. Physics of the Earth and Planetary Interiors 157 (2006) 8–15.

Wang, H; Cai, G; Cheng, Q. *Data Integration Using Weights Of Evidence Model: Applications In Mapping Mineral Resource Potentials*. School of Information Science and Technology, Pennsylvania State University, U. S. A ; Department of Earth and Atmospheric Science and Department of Geography, York University, Canada. Commission VI.S/d.

Warner, T.A; Campagna, D.J; 2009. *Remote Sensing With IDRISI Taiga. A Beginners Guide*. Published by Geocarto International Centre.

Watson, K; Fitterman, D; Saltus, R.W; McCafferty, A; Swayze,G; Church,S; Smith,K; Goldhaber,M; Robson,S;McMahon,P; 2001. *Application Of Geophysical Techniques To Minerals-Related Environmental Problems*. U.S. Geological Survey Open-File Report 01-458.

Webb, A.D; Dickens, G.R; Olivera, N.H.S; 2003. *From banded iron-formation to iron ore: geochemical and mineralogical constraints from across the Hamersley Province, Western Australia*. Elsevier, Chemical Geology 197 (2003) 215-251.

Zeiler. M; 1999. *Modeling our world. The ESRI Guide to Geodatabase Design*. Published by Environmental Systems Research Institute, Inc. 380 New York Street Redlands, California 92373-8100.