

1. INTRODUÇÃO

Foi em Março de 1896, que o físico francês António Henri Becquerel verificou que os sais de urânio emitem radiação. Essa radiação foi denominada de radiação penetrante pelo mesmo cientista.

Dada a complexidade do fenómeno e o interesse por parte de outros cientistas, como é o caso do casal Curie, as descobertas prosseguiram ao ponto de, entre outras descobertas, Marie Curie ter denominado o mesmo fenómeno de emissão de radiação da radioactividade.

Actualmente a radioactividade tem aplicações diversas, com destaque nos seguintes campos:

- médico, quando se aproveita a sua capacidade de penetração e a perfeita definição do feixe emitido para o tratamento de tumores, de diversas doenças da pele e dos tecidos em geral;
- industrial, quando são criadas áreas de obtenção de energia mediante procedimentos de fissão ou de ruptura de átomos pesados, também designada por energia nuclear;
- científico, quando são fornecidos, através de mecanismos de bombardeamento de átomos e de aceleração de partículas, meios para alcançar o aperfeiçoamento do conhecimento sobre a estrutura da matéria nos níveis de organização subatômica, atómico e molecular.

Os materiais radioactivos são também utilizados no fabrico de substâncias fluorescentes e de relógios científicos, os quais se baseiam nos fundamentos da geocronologia e da cosmocronologia para a obtenção de medidas precisas de tempo. O radão é a principal fonte de radioactividade natural a que o homem está exposto. Os riscos para saúde não provêm exclusivamente dos radioisótopos do radão, mas também dos seus descendentes de vida curta, os quais podem ser inalados tal como o gás progenitor. Estes descendentes, nomeadamente ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{211}Bi , ^{214}Po , ^{216}Po , encontram-se em concentrações diversas no ar respirável, agregados às gotículas de água e dispersos nos aerossóis. O decaimento destes radioisótopos nos pulmões irradia células pulmonares com emissão de partículas α e β , com energias variáveis de 5,5 a 8,8 Mev. As células com mais elevada probabilidade de serem atingidas são as secretoras de muco e as basais (I.A.E.A, 1973; SAMET,1997), admitindo-se que a sua

exposição ao radão e aos seus descendentes ao longo de vários anos possa induzir à transformação em células cancerosas.

Estando a produção do gás radão ligada à ocorrência de elementos radioactivos nas rochas, a distribuição espacial destas condicionará o risco para as populações por exposição a radiações ionizantes.

Em Angola são muito escassos os dados sobre os níveis de radioactividade de origem natural. Recentemente Chipalavela (2011) e António (2011) apresentaram alguns resultados obtidos na região de Benguela-Lobito relativos, respectivamente, à taxa de dose por exposição à radiação gama no ar e fluxos de radiação emitidos pelas rochas. Estes resultados mostram a existência de alguma variabilidade no fundo radiométrico e, em alguns, casos as taxas de dose obtidas foram bastante significativas.

O objectivo deste trabalho será o da avaliação dos níveis de radioactividade natural ao longo do rio Catumbela (Catumbela - Angola), avaliando-se a emissão dos fluxos de radiação em algumas das rochas aflorantes. Para a concretização deste estudo utilizar-se-ão medições dos fluxos dos três tipos de radiação: alfa, beta e gama.

O trabalho foi estruturado da seguinte forma:

1. Introdução, onde se faz a descrição da situação em que se encontra o objecto de estudo; descrição dos objectivos bem como da estrutura do trabalho.
2. Revisão da bibliografia, iniciada com o levantamento detalhado de trabalhos recentes relacionados com o tema da pesquisa (radiações e radioactividade natural, com destaque particular para o gás radão). Sendo um tema actual e objecto de inúmeras pesquisas em diversos países pesquisaram-se também trabalhos recentes sobre temáticas semelhantes, publicados em livros de teses, artigos, actas de congressos, em sites e outros documentos técnicos e científicos.
3. Síntese geral, enquadramento geomorfológico e geológico da região em estudo.
4. Descrição dos resultados obtidos na caracterização radiológica das rochas estudadas ao longo do rio Catumbela, e explanação das implicações dos mesmos.
5. Conclusões
6. Bibliografia e Anexos.

2. A RADIOACTIVIDADE NATURAL – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Introdução

A radioactividade é um fenómeno natural ou artificial, pelo qual algumas substâncias ou elementos químicos, chamados radioactivos, são capazes de emitir radiações, as quais têm a propriedade de impressionar placas fotográficas, ionizar gases, produzir fluorescência, atravessar corpos opacos à luz ordinária, etc. As radiações emitidas pelas substâncias radioactivas são principalmente partículas e radiação electromagnética.

A radioactividade é uma forma de energia nuclear, usada em medicina (radioterapia), e consiste no facto de alguns átomos como os urânio, rádio e tório serem «Instáveis». O urânio, por exemplo, tem 92 protões, porém, através dos séculos, vai perdendo-os na forma de radiações, até terminar em chumbo, com 82 protões estáveis.

A radioactividade pode ser:

- Radioactividade natural ou espontânea: É a que se manifesta nos elementos radioactivos e nos isótopos que se encontram na natureza e poluem o meio ambiente, como a seguir se discrimina:

- 1- Exalação para a atmosfera de ^{222}Rn e ^{220}Rn , formado através da desintegração radioactiva de ^{226}Ra e do ^{226}Ra (constituintes naturais de solos e rochas), pertencentes às series radioactivas naturais do urânio e do tório, respectivamente;
- 2- Formação de radionuclidos cosmogénicos através da interacção das radiações cósmicas com gases atmosféricos como o carbono, o azoto e o oxigénio
- 3- A radioactividade natural tecnologicamente aumentada, resultante da utilização industrial de matérias-primas que contêm radionuclidos naturais e cujo processamento conduz à redistribuição e à concentração desses constituintes radioactivos;

- Radioactividade artificial ou induzida: É aquela que é provocada por transformações nucleares artificiais. Os radionuclidos artificiais são produtos de cisão e de activação,

em virtude de actividades antropogénicas (testes nucleares, produção de energia eléctrica por via nuclear, produção de radioisótopos, acidentes, etc.).

A radioactividade é um processo natural e espontâneo em que um átomo instável de um elemento decai ou se desintegra formando um outro elemento através da perda de partículas atómicas (protões, electrões ou neutrões). Este decaimento é acompanhado pela libertação de radiação, que pode ser de três tipos – alfa (α), beta (β) e gama (γ).

2.2. Conceitos básicos

2.2.1 Desintegração radioactiva

O decaimento radioactivo é a transmutação de um elemento radioactivo (elemento pai) para outro elemento (elemento filho), chamado radiogénico, por perda de partículas alfa ou beta.

A desintegração ocasiona emissão de partículas do núcleo do átomo que se desintegra. Nesta emissão há modificação do núcleo original. Então o número total de átomos do elemento pai (o elemento inicial do processo, antes da desintegração) é reduzido e, conseqüentemente, aumenta o número de átomos do elemento produto da desintegração (filhos).

Toda desintegração radioactiva envolve a emissão de uma partícula alfa ou beta do núcleo do átomo que se desintegra, ou ainda radiação electromagnética designada por gama, e ocorre num determinado período de tempo. Designa-se este tempo por meia-vida, que é o tempo necessário para que a metade dos átomos presentes num elemento se desintegre. O tempo de meia-vida é uma característica de cada isótopo radioactivo e não depende da quantidade inicial do isótopo nem de factores como pressão e temperatura. Veja-se o exemplo seguinte da desintegração de um elemento que emite radiação do tipo alfa:



Pela análise da equação, verifica-se que a desintegração do átomo de urânio produziu uma partícula com carga eléctrica positiva, constituída por dois neutrões e dois protões. Outras características destas partículas são as seguintes: deslocam-se a uma velocidade média de 20.000 km/s, possuem um elevado poder ionizante ao ar e, eventualmente, podem capturar electrões, transformando-se em átomos de hélio. No entanto, possui pequeno poder de penetração, sendo detidas pela pele humana, uma folha de papel ou apenas 7 cm de ar. Na emissão de partículas alfa, o isótopo

resultante (tório-231) apresenta por consequência um número atómico duas unidades inferiores e um número de massa quatro unidades inferiores ao do isótopo progenitor (urânio-235), como se verifica no exemplo acima. Este tipo de desintegração foi referenciado pela primeira vez por Ernest Rutherford em 1898.

No caso das partículas beta cita-se o exemplo seguinte:



Neste caso, regista-se a emissão de uma partícula com carga eléctrica negativa e massa desprezível (equivalente a um electrão). Estas partículas possuem uma velocidade média 95% da velocidade da luz e são 50 a 100 vezes mais penetrativas e menos ionizantes que a radiação alfa. São detidas por 1 cm de alumínio ou 2 mm de chumbo, podendo, no entanto, penetrar até 2 cm no corpo humano. Na emissão de partículas beta, o isótopo resultante apresenta um número atómico superior em uma unidade e um número de massa igual. No exemplo apresentado o isótopo 40 do potássio converte-se espontaneamente no isótopo 40 de cálcio, através da emissão de uma partícula beta.

Geralmente após a emissão de uma partícula alfa ou beta, o núcleo resultante desse processo, ainda com excesso de energia, procura estabilizar-se, emitindo esse excesso em forma de onda electromagnética, da mesma natureza da luz e semelhantes ao raio-X. Esta onda denomina-se por radiação gama. Possui uma velocidade igual à da luz, ou seja, 300.000 km/s. Possui alto poder de penetração, sendo mais penetrante que os raios-X, e é detida por lâminas de chumbo com espessura mínima de 5 cm. Quando um núcleo excitado emite radiação gama não ocorre variação no seu número de massa, nem no seu número atómico, porém, ocorre a emissão de energia do tipo electromagnético.

No caso de um átomo instável se desintegrar através do chamado decaimento α , o núcleo atómico liberta partículas α de alta velocidade compostas por dois prótons e dois neutrões. O decaimento β consiste na desintegração do núcleo atómico através da produção de partículas β (electrões de alta velocidade).

O mesmo átomo instável, ou radionuclídeo, pode decair sob qualquer das formas, embora não simultaneamente. Outra forma de radiação normalmente associada às duas anteriores é a radiação γ . Trata-se aqui de radiação electromagnética ou fotões emitidos pelo núcleo atómico.

Os três tipos de radiação referidos são emitidos a altíssimas velocidades. Como possuem carga eléctrica, as partículas α interagem com a matéria, podendo ser desaceleradas ou mesmo travadas pela interacção dos electrões presentes na matéria

atravessada. As partículas β como são emitidas a uma maior velocidade têm maior poder penetrativo, embora o processo de desaceleração seja semelhante. Por não terem carga eléctrica, os raios γ não interagem tão facilmente com a matéria.

2.2.2 Tipos de Radiação – Caracterização Básica

Existem três tipos de radiação: alfa, beta e gama. Becquerel, Ernest Rutherford, da Nova Zelândia, Marie e Pierre Curie, da França, foram os responsáveis pela sua identificação.

Quando submetemos as emissões radioactivas naturais, por exemplo do polónio ou do rádio, num campo eléctrico ou magnético, notamos a sua subdivisão em três tipos bem distintos. Veja a figura abaixo:

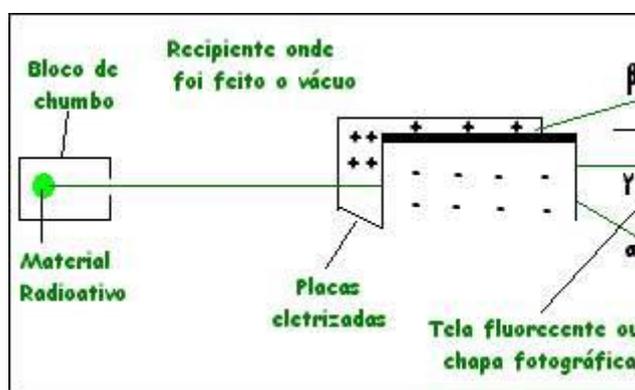


Fig 2.1- campo eléctrico ou magnético da radiação
(<http://www.coladaweb.com/quimica/>)

A emissão que sofre um pequeno desvio para o lado da placa negativa foi denominada de emissão alfa.

A que sofre um desvio maior para o lado da placa positiva foi denominada de emissão beta.

A que não sofre desvio foi chamada de emissão gama.

2.2.2.1 Radiação Alfa

Os raios Alfa têm uma carga eléctrica positiva. Consistem em dois prótons e dois neutrões, e são idênticos aos núcleos dos átomos de hélio. Os raios alfa são emitidos com alta energia, mas perdem rapidamente essa energia quando passam através da matéria. Uma ou duas folhas de papel podem deter os raios alfa. Quando um núcleo emite uma partícula alfa, perde dois prótons e dois neutrões.

Por exemplo, a radiação alfa ocorre no U238, um isótopo do urânio que tem 92 prótons e 146 neutrões. Após a perda de uma partícula alfa, o núcleo tem 90 prótons e 144 neutrões. O átomo com número atómico 90 não é mais o urânio, mas o tório. O isótopo formado é o ^{234}Th

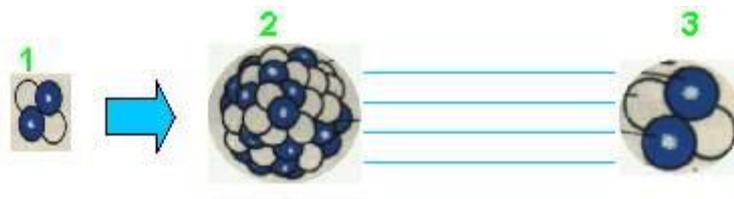


Fig 2.2-Radiação Alfa (<http://www.coladaweb.com/quimica/>)

- 1- As partículas alfa são núcleos de hélio. Consistem em dois prótons e dois neutrões que se comportam como uma partícula única.
- 2- O núcleo do rádio, no qual prótons e neutrões se unem para formar uma partícula alfa.
- 3- A partícula alfa é emitida pelo núcleo.

2.2.2.2 Radiação Beta

Alguns núcleos radioactivos emitem electrões comuns, os quais têm a carga eléctrica negativa. Há os que emitem prótons, os quais são electrões positivamente carregados.

Quando um núcleo emite uma partícula beta, também emite um neutrino. Um neutrino não tem carga eléctrica e quase não tem massa. As partículas beta propagam-se com velocidade quase igual à da luz e pode surgir, por vezes, a penetração dos núcleos radioactivos em mais de 1 cm de madeira.

Na radiação de partículas beta negativas, um neutrão no núcleo transforma-se em um próton, um electrão negativo e um neutrino. O electrão e o neutrino são emitidos no instante em que se formam, e o próton permanece no núcleo. Isto significa que o núcleo passa a conter mais um próton e menos um neutrão.

Por exemplo, um isótopo de carbono, o ^{14}C ou C-14, emite electrões negativos. O C-14, tem oito neutrões e seis prótons. Quando se desintegra, um neutrão transforma-se em um próton, um electrão e um neutrino. Após a emissão do electrão e do neutrino, o núcleo contém sete prótons e sete neutrões. O seu número de massa permanece o mesmo, mas seu número atómico aumenta de um. O elemento com número atómico sete é o nitrogénio. Assim, o C-14 transforma-se no ^{14}N após a emissão de uma partícula beta negativa.

Quando o núcleo emite um protão, do núcleo transforma-se em um neutrão positivo. O protão e o neutrão são emitidos no mesmo instante da sua formação, e o neutrão permanece no núcleo.

Um isótopo de carbono, o ${}^6\text{C}11$, emite protões. O C11 tem seis protões e cinco neutrões. Quando emite um positivo, um protão transforma-se em um neutrão, um positivo e um neutrino. Após a emissão do positivo e do negativo, o núcleo contém cinco protões e seis neutrões. O número de massa permanece o mesmo, mas o número atómico cai uma unidade. O elemento do número atómico cinco é o boro. Assim, o ${}^6\text{C}11$ transforma-se no ${}^5\text{B}11$, após a emissão de um positivo e de um negativo.

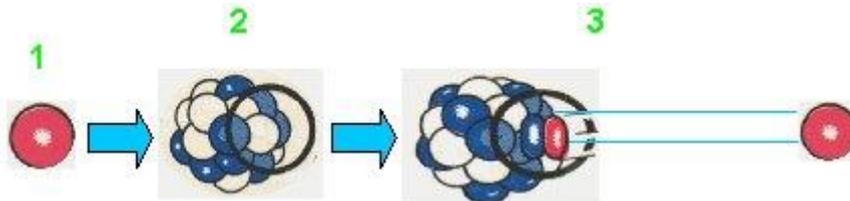


Fig 2.3- Radiação Beta (<http://www.coladaweb.com/quimica/>)

1- As partículas beta são electrões em alta velocidade emitidos por certos átomos radioactivos.

2- Os electrões negativos formam-se pela desintegração de um neutrão. Os electrões positivos formam-se pela desintegração de um protão.

3- A partícula beta é arremessada no instante em que se forma. Um neutrino, uma partícula quase sem peso, também é emitido.

2.2.2.3 Radiação Gama

Os raios gama não têm carga eléctrica. São semelhantes ao raio x, mas normalmente têm um comprimento de onda mais curto. Esses raios são fotões (partículas de radiação electromagnética), propagam-se com a velocidade da luz e são muito mais penetrantes do que as partículas alfa e beta.

A radiação gama pode ocorrer de diversas maneiras. Num processo, a partícula alfa ou beta emitida por um núcleo não transporta toda a energia disponível.

Depois da emissão, o núcleo tem mais energia do que no seu estado mais estável e livra-se do excesso, emitindo raios gama. Nenhuma transmutação se verifica no caso dos raios gama.

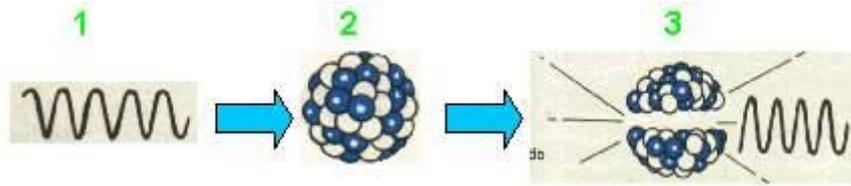


Fig 2.4- Radiação Gama (<http://www.coladaweb.com/quimica/>)

- 1- Os raios gama são partículas, ou fótons, de energia electromagnética.
- 2- Núcleo do rádio.
- 3- Os raios gama são liberados quando um núcleo, após uma desintegração radioactiva, fica num estado de alta energia.

Tabela:2.1 características dos tipos de radiação (<http://www.coladaweb.com/quimica/>)

Radiação	Alfa	Beta	Gama
Poder de Ionização	Alto. A partícula alfa captura 2 elétrons do meio, se transformando em átomo de hélio.	Médio. Por possuírem carga elétrica menor possuem menor poder de ionização.	Pequeno. Não possuem carga.
Danos ao ser humano	Pequenos. São detidos pela camada de células mortas da pele, podendo no máximo causar queimaduras.	Médio. Podem penetrar até 2 cm e ionizar moléculas gerando radicais livres.	Alto. Pode atravessar completamente o corpo humano, causando danos irreparáveis como alteração na estrutura do DNA.
Velocidade	5% da velocidade da luz	95% da velocidade da luz	Igual a velocidade da luz 300000 Km/s
Poder de Penetração	Pequeno. Uma folha de papel pode deter.	Médio. É 50 a 100 vezes mais penetrantes que a alfa. São detidas por uma chapa de chumbo de 2 mm.	Alto. Os raios Gama são mais penetrantes que os raios x. São detidos por uma chapa de chumbo de 5 cm.

2.3. Elementos Radioactivos

Vejamos agora alguns exemplos de elementos químicos radioactivos e algumas das suas propriedades:

Rádio - metal de símbolo Ra, número atómico 88, massa atómica 226,05, descoberto em 1898 por Pierre e Marie Curie. É dotado de intensa radioactividade. O rádio é um metal alcalino terroso, que funde a 700 °C. Muito raro na natureza, é extraído da pechblenda. Desintegra-se com uma vida média de 1620 anos, produzindo uma emissão gasosa de hélio e de radão. Esse último, também radioactivo, transmuta-se no polónio que, por uma série de novas desintegrações, conduz finalmente ao chumbo 206. As radiações alfa, beta e gama emitidas pelo rádio são dotadas de grande poder bactericida e sua acção fisiológica acarreta a destruição dos tecidos e a suspensão da mitose, donde diversas aplicações terapêuticas (curieterapia).

Tório - metal raro de símbolo Th, número atómico 90, massa atómica 232,038, branco, cristalino, de densidade 12,1, e que funde a 1700°C, aproximadamente, extraído da torite.

Urânio - Metal de símbolo U, número atómico 92, massa atómica 238,07, e densidade de 18,7, extraído do óxido de urânio. Último elemento natural da classificação periódica, o urânio foi isolado em 1841 por Péligot. Trata-se de um sólido cinza-ferro, que funde a 1800°C e se oxida facilmente. O óxido uranoso, ou urano, UO_2 , é um sólido negro. O anidrido urânico, UO_3 , alaranjado, é anfótero e produz, em reacção com ácidos, sais de uranilo (pois contém o radical UO_2). Tais sais são amarelos e dotados de fluorescência verde. O UO_3 dá também, ao reagir com as bases, os uronatos, como o Na_2UO_4 ; este, incorporado ao vidro, resulta no vidro de urânio, que se torna fosforescente sob a acção de raios ultravioletas. O minério de urânio mais importante é a pechblenda, ou uraninite, U_3O_8 .

Foi no urânio que Henri Becquerel descobriu a radioactividade. O produto natural é uma mistura de três isótopos, entre os quais o U238, mais abundante, gerador da família do rádio, e o U-235, gerador da família do actínio. Sob a acção de neutrões, o urânio-238 pode transformar-se em plutónio, e o urânio-235 pode sofrer fissão nuclear.

Em virtude da baixa concentração do urânio nos seus diversos minérios (em geral menos de 1%), os tratamentos metalúrgicos compreendem inicialmente uma concentração física e, depois, uma concentração química dos sais de urânio. Após a purificação do concentrado, o metal é elaborado, a partir do tetrafluoreto, por redução metalotérmica pelo magnésio ou pelo cálcio. É afinado por refusão a vácuo antes de enformado e tratado termicamente. O urânio é utilizado sobretudo como combustível nos reatores nucleares (barras, tubos, anéis); seja em estado puro, seja em liga como o molibdénio, ou ainda em compostos refratários (óxido, carboneto). Pode também ser

enriquecido num isótopo fóssil, principalmente pelo processo selectivo da difusão gasosa do hexafluoreto através de paredes porosas, ou pelo processo de ultra centrifugação.(<http://www.coladoweb.com/>).

Polónio - metal de símbolo Po, radioactivo, de número atómico 84, massa atómica 210, que acompanha geralmente o rádio.

2.3.1 – Séries radioactivas ou famílias radioactivas naturais

Na natureza existem elementos radioactivos que realizam transmutações ou "desintegrações" sucessivas, até que o núcleo atinja uma configuração estável. Isso significa que, após um decaimento radioactivo, o núcleo não possui, ainda, uma organização interna estável e, assim, ele executa outra transmutação para melhorá-la e, ainda não conseguindo, prossegue, até atingir a configuração de equilíbrio. Em cada decaimento, os núcleos emitem radiações dos tipos alfa, beta e/ou gama e cada um deles é mais "organizado" que o núcleo anterior. Essas sequências de núcleos são denominadas SÉRIES RADIOACTIVAS OU FAMÍLIAS RADIOACTIVAS NATURAIS. (www.cnen.org.br).

No estudo da radioactividade, constatou-se que existem apenas 3 séries ou famílias radioactivas naturais, conhecidas como: Série do Urânio, Série do Actínio e Série do Tório. A Série do Actínio, na realidade, inicia-se com o urânio-235 e tem esse nome, porque se pensava que ela começava pelo actínio-227. As três séries naturais terminam em isótopos estáveis do chumbo, respectivamente, Pb-206, Pb-207 e Pb-208.

Os principais elementos das séries acima mencionadas são apresentados nas figuras seguintes:

Urânio – 238

4,5 Bilhões de ano

α ↓

Tório – 234

246 Dias

β ↓

Protactínio – 234

1,4 Minutos

β ↓

Urânio – 234

270.000 Anos

$\alpha\downarrow$
Tório – 230
83.000 Anos
 $\alpha\downarrow$
Rádio – 226
1.600 Anos
 $\alpha\downarrow$
Radão – 222
3,8 Dias
 $\alpha\downarrow$
Polónio – 218
3,05 Minutos
 $\alpha\downarrow$
Chumbo – 214
26.8 Minutos
 $\alpha\downarrow$
Bismuto – 214
19,7 Minutos
 $\beta\downarrow$
Polónio – 214
0.164 Minutos
 $\alpha\downarrow$
Chumbo – 210
22 Anos
 $\alpha\downarrow$
Bismuto – 210
5 Dias
 $\beta\downarrow$
Polónio – 210
140 Dias
 $\alpha\downarrow$
Chumbo – 206
Estável

Fig. 2.5 – Série de decaimento do ^{238}U (adapt. CNEN)

Urânio – 235

713 Milhões de anos

$\alpha\downarrow$

Tório – 231

24,6 Horas

$\beta\downarrow$

Protactínio – 231

32.000 Anos

$\alpha\downarrow$

Actínio – 227

13,5 Anos

$\alpha\swarrow$ $\searrow\beta$

Frâncio – 223

21 Min.

Tório – 227

18,9 Dias

$\searrow\beta$ $\alpha\swarrow$

Rádio – 223

11,4 Dias

$\alpha\downarrow$

Radão (actinão) – 219

3,9 Segundos

$\alpha\downarrow$

Polónio – 215

0,002 Seg.

$\alpha\swarrow$ $\beta\searrow$

Chumbo – 211

36.1 Minutos

Astato – 215

0,0001 Seg.

$\beta\searrow$ $\alpha\swarrow$

Bismuto - 211

2.14 Minutos

$\alpha\swarrow$ $\beta\searrow$

Titânio – 207

4.77 Minutos

polónio – 211

0,005 Seg.

$\beta\searrow$ $\alpha\swarrow$

Chumbo – 207

Estável

Fig. 2.6. Decaimento do ^{235}U (adapt. CNEN)

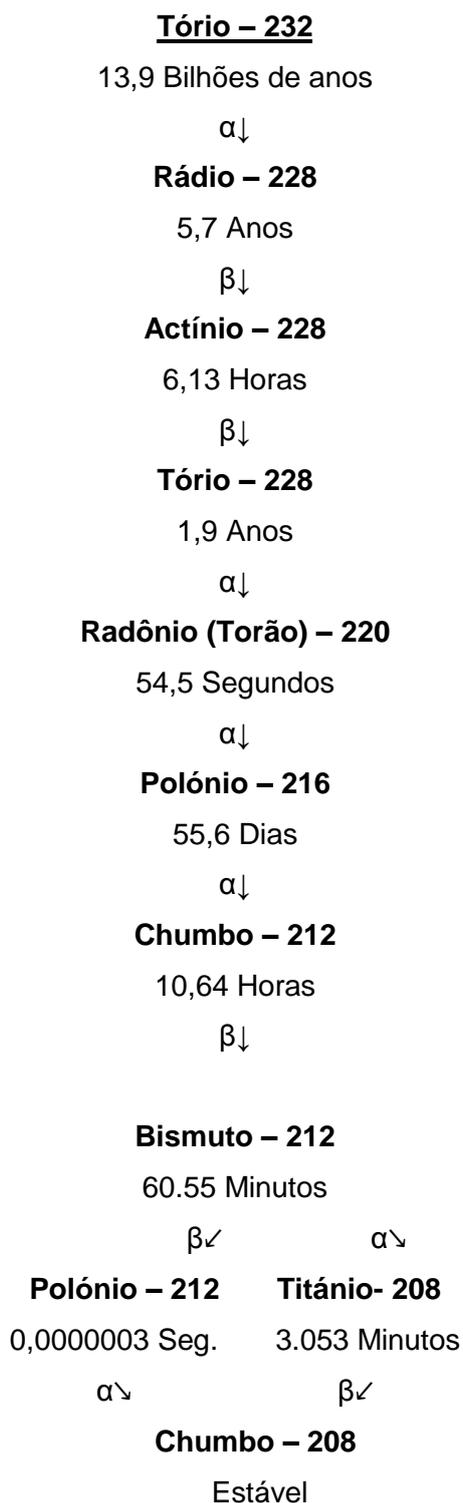


Fig. 2.7 – Decaimento do $^{232}\text{Tório}$ (adapt. CNEN)

Alguns elementos radioactivos têm meia-vida muito longa, como, por exemplo, os elementos iniciais de cada série radioactiva natural (urânio-235, urânio-238 e tório-232). É assim que é possível explicar porque há uma percentagem tão baixa de

urânio-235 em relação à de urânio-238. Como a meia-vida do urânio-235 é de 713 milhões de anos e a do urânio-238 é de 4,5 bilhões de anos, o urânio-235 decai muito mais rapidamente e, portanto, é muito mais "consumido" que o urânio-238. Com o desenvolvimento de reactores nucleares e de máquinas aceleradoras de partículas, muitos radioisótopos puderam ser "fabricados" (produzidos), utilizando-se isótopos estáveis como matéria-prima. Com isso, surgiram as Séries Radioactivas Artificiais, algumas de curta duração.

2.4. Fontes de radiação

2.4.1 Radioactividade de Origem Natural

2.4.1.1 Origem terrestre

As rochas e solos contêm elementos químicos radioactivos designados por primordiais e que integram as séries de decaimento radioactivo atrás discutidas embora em concentrações muito variadas.

2.4.1.1.1 *Concentração de elementos radioactivos em materiais geológicos*

De acordo com Taylor e Mclennan (1985), os teores médios dos elementos radioactivos U, Th e K na crosta terrestre são de 2,8 ppm, 10,7 ppm e 2,8%, respectivamente.

O urânio ocorre no estado de oxidação tetravalente U^{4+} , que podemos encontrar na composição dos minerais próprios dos primários do urânio (exemplo: uraninite) ou no estado hexavalente (U^{6+} ou UO_2^{2+}), o qual se forma sob condições oxidantes. Esta última forma de urânio pode ser observada na composição dos minerais secundários que lhe podem servir de suporte, como a autunite, a torbenite e em mais cerca de cem minerais, incluindo vários óxidos, hidróxidos, carbonatos, sulfatos, molibdatos, fosfatos, arsenatos, vanadatos e silicatos (Boyle, 1982; citado por Gonçalves, 2006, p2). Os compostos, em que o ião uranilo (UO_2^{2+}) está presente, são solúveis na água. Esta possibilidade permite uma grande mobilidade da crosta do urânio que se encontra neste estado. Pelo contrário, os compostos em que participa o ião U^{4+} , não possuem esta faculdade (Faure, 1986; citado por Gonçalves, 2006, p2). O urânio aparece normalmente associado às rochas mais siliciosas da crosta, em consequência dos processos de diferenciação que conduzem à sua concentração nos

líquidos das fases finais da cristalização magmática (Faure, 1986; citado por Gonçalves, 2006, p2).

O tório é um metal que, quando se encontra puro, é branco prateado e mantém o seu brilho por diversos meses; não se encontra livre na natureza, constituindo jazidas com menos frequência comparativamente com o caso do urânio.

O potássio encontra-se na maioria dos silicatos, sendo o ^{40}K um dos seus componentes.

A concentração dos elementos radioactivos varia consoante a composição dos seus materiais geológicos constituintes, sejam estas rochas magmáticas, sedimentares ou metamórficas.

Nas rochas ígneas, os teores médios de urânio mais elevados são encontrados em sienitos e em granitos com valores superiores a 4 ppm (tabela.2.2). As rochas vulcânicas possuem, em geral, teores mais baixos, em especial no caso daquelas cuja composição é mais básica. Neste último caso, os teores médios do urânio podem ser mesmo inferiores a 1 ppm. As rochas ultramáficas, por exemplo, apresentam-se praticamente desprovidas de elementos radioactivos. O tório segue um padrão similar, com excepção para os andesitos, os quais demonstram valores um pouco mais elevados (8 ppm).

Com base em mais de 200 amostras analisadas, Neves *et al.* (1996) estimam-se, para os granitóides portugueses, teores médios de urânio compreendidos entre os 6.7 ppm (granitóides biotíticos) e os 8.9 ppm (granitóides de duas micas).

As acumulações de elementos radioactivos em concentrações elevadas podem gerar jazigos minerais. Os jazigos minerais primários de urânio ocorrem em complexos vulcânicos de natureza ácida, em associação com intrusões alcalinas anorogénicas, ou rochas filonianas que ocorrem no interior ou na periferia de grandes massas magmáticas. Dada a elevada mobilidade do urânio, quando na forma de U^{6+} , podem formar-se importantes jazidos secundários, por disseminação em rochas pré-existentes, em filões ou em fracturas (Dias e Andrade, 1970).

Tabela.2.2 - Concentrações médias de U e Th em algumas rochas ígneas, metamórficas e sedimentares. (Adaptado de Boyle, 1982; Faure, 1986).

Rochas	Urânio (ppm)	Tório (ppm)
Ultramáficas	0,01	0,05
Gabros	0,84	3,8
Basaltos	0,43	1,6
Andesitos	2,4	8,0
Granitos	4,8	21,5
Filitos e meta-argilitos	2,5	10,0

Tabela.2.2 – Continuação.

Rochas	Urânio (ppm)	Tório (ppm)
Quartzitos e metagrauvaques	1,5	5,0
Granulitos	1,6	7,2
Mármore	0,5	1,0
Arenitos	1,4	3,9
Lutitos	3,5	12,0
Rochas carbonatadas	1,9	1,2

Grande parte do urânio ocorre em minerais acessórios, como o zircão, a alanite, a esfena (silicatos), a monazite, a apatite, a xenotima (fosfatos) e a uraninite (óxido), a qual é um mineral próprio do urânio e um acessório frequente.

As rochas sedimentares mostram, em geral, concentrações de urânio mais baixas do que as rochas ígneas siliciosas (tabela2.3), apresentando as carbonatadas e as detríticas grosseiras teores médios que não excedem os 2 ppm. As rochas silto – argilosas são aquelas que apresentam os mais elevados teores de urânio. Em rochas sedimentares detríticas, o urânio surge normalmente associado a minerais resistentes que lhe servem de suporte (zircão, monazite, apatite). Pode surgir também absorvido pelas fracções argilosas ou como co-precipitado sob diversas formas como no caso dos óxidos e dos hidróxidos de ferro (Boyle, 1982; citado por Gonçalves, 2006, p3). É às rochas sedimentares formadas durante o Pré-câmbrico (2400 a 800 Ma), que estão associados os maiores depósitos mundiais de urânio.

As rochas metamórficas têm concentrações relativamente baixas de U e de Th, possuindo teores médios similares aos das rochas sedimentares.

Na tabela 2.3 procura-se, de uma forma qualitativa, comparar os teores dos elementos radioactivos, em diferentes tipos de rochas. Nesta, verifica-se que as litologias, que tendem a apresentar as mais elevadas concentrações de elementos radiogénicos em geral e de urânio, em particular, são os materiais sedimentares silto – argilosos e as rochas graníticas.

Na base das concentrações médias de alguns radioisótopos das séries radioactivas naturais, procurou-se estimar a dose por exposição à radiação gama, produzida pelo decaimento radioactivo, expondo-se os resultados na tabela 2.4, para o caso das rochas ígneas e sedimentares (Perez, 1978).

Tabela 2.3 - Concentrações típicas de litologias mais correntes relativamente à média da crosta continental superior; (-) inferior, (≈) próximo da média e (+) superior à média (adaptado de Pereira *et al.*, 2004).

Tipo de rocha	Elementos radioactivos		
	U	Th	K
Rochas sedimentares			
Carbonatos	-	-	-
Conglomerados	-	-	-
Arenitos	≈	+	≈
Argilitos	+	+	+
Rochas metamórficas			
Xistos	≈	≈	≈
Metagrauvaques	-	-	-
Quartzitos	-	-	-
Gneisses	≈	≈	≈
Anfibolitos	-	-	-
Rochas ígneas			
Gabros, Dioritos	-	-	-
Tonalitos, Granodioritos	≈	≈	≈
Granitos	+	+	+

Tabela 2.4 - Dose por exposição à radiação gama em diferentes tipos de rochas (em mSv/ano).

TIPO DE ROCHA	Ra-226	U-238	Th-232	K-40	TOTAL
Ígneas	0,24	0,26	0,37	0,35	0,98
Sedimentares	0,14	0,08	0,18	0,18	0,50

Como expectável, as doses de radiação gama por exposição à radiação gama são, em média, mais elevadas nas rochas ígneas do que nas rochas sedimentares (0,98 mSv/ano, contra 0,50 mSv/ano)

2.4.1.1.2 – O caso particular do gás radão

O Radão (^{222}Rn) é um gás radioactivo que ocorre nas rochas, nos solos, no ar e na água. É gerado por decaimento do urânio (^{23}U), um elemento químico presente em

quantidades variáveis nas rochas, o qual é incolor e inodoro. Estas duas características permitem ao radão existir como se fosse invisível, o que faz com que não se torne óbvio o risco a ele associado, em particular nas casas de habitação, onde, aliás, este se tende a concentrar.

O radão e os seus descendentes radiogénicos introduzem-se nos pulmões através das vias respiratórias, fixando-se aí os isótopos de polónio, o chumbo e o bismuto, os quais são gerados por decaimento sucessivo. Surge depois a consequente emissão da radiação ionizante. Tendo estes isótopos períodos de meia vida que não excedem alguns minutos, a irradiação contínua que se produz nos tecidos pulmonares surge em reduzidos intervalos de tempo, até ser atingida uma forma final estável de (^{206}Pb).

A Agência de Protecção Ambiental dos EUA (EPA) estima que 1 a 3 em cada 100 pessoas que, durante a sua vida, inalem ar com concentrações de radão não inferiores a 150 Bq.m^{-3} (1 Bequerel corresponde a uma desintegração por segundo), incorrem no risco de contrair cancro do pulmão; este risco é significativamente incrementado no caso dos fumadores, visto ocorrer uma sinergia entre os dois factores.

De acordo com OTTON (1992) as concentrações de radão no solo podem variar desde os 740 Bq/m^3 aos $3\,700 \text{ kBq.m}^3$. Segundo o mesmo autor, no Estado Unidos foram encontrados valores médios que oscilam entre os 7.4 e 74 kBq.m^3 . Alguns dos valores mais elevados registados nos Estados Unidos foram obtidos em zonas de fracturação cizalhante (GUNDERSEN *et al.*, 1992).

Em Portugal, os valores obtidos em vários tipos de solos mostram variações para os valores médios de radão no solo desde 2 a 114 kBq.m (PEREIRA *et al.*, 1998a; PEREIRA *et al.*, 1998c; COSTA, 1997 e COSTA *et al.*, 1998), contudo, concentrações de ca. $78\,000 \text{ kBq.m}^3$ foram já encontrados em solos portugueses Neves *et al.*, (2009);

Estes valores, no entanto, serão diferentes consoante as profundidades a que forem medidos no solo. Os trabalhos desenvolvidos pelo *Swedish Geotechnical Institute* mostrarão claramente que as concentrações de radão aumentam com a profundidade. Em medições efectuadas nos mesmos locais mas a diferentes profundidades (30cm, 60cm e 90cm), os resultados sugerem que à profundidade de 90cm os valores são, aproximadamente, o dobro daqueles que podem ser observados a 30cm da superfície (AKERBLOM, 1994).

No intuito de minimizar as variações provocadas pelos agentes meteorológicos atrás referidos, este autor é de opinião de que os dados sobre as concentrações de radão nos solos devem ser obtidos a uma profundidade mínima de 70 cm. Pelo seu

lado, APPLETON & BALL (1995) e GATES & GUNDERSEN (1992) recomendam a colheita de dados aos 50-60 cm e 75 cm, respectivamente. Trabalhos desenvolvidos em solos portugueses de vários tipos, mostram que as concentrações medidas à profundidade de 30 cm, correspondem a cerca de 20% dos valores encontrados a uma profundidade de 80 cm (PEREIRA *et al.*, 1998b).

A relação entre os valores encontrados a 30 e a 80 cm não é, portanto, constante, e depende essencialmente da permeabilidade do solo.

A determinação *in situ* das concentrações de radão nos solos é feita através de 2 grupos de métodos: os passivos e os extractivos.

Os métodos passivos envolvem a colocação de detectores no solo a profundidades reduzidas (inferiores a 50 cm). Estes são cobertos pelo material do solo e aí permanecem por longos períodos de tempo, geralmente por um mês. Uma desvantagem deste método é a grande perturbação que ele induz no solo e na sua atmosfera. No entanto, pode ser útil nos locais onde se verificam variações temporais elevadas. Existem outros métodos mais imediatos, os detectores usados actualmente são películas plásticas insensíveis à luz e que são danificadas quando bombardeadas por partículas alfa.

Os traços marcados nas películas são mais tarde revelados quimicamente pela imersão em soluções alcalinas cáusticas. A determinação da concentração do radão é feita através da quantificação da densidade de traços deixados no detector pelas partículas alfa. Existem outros métodos, menos usados, que utilizam materiais absorventes como sílica-gel ou carvão activado.

Os métodos extractivos têm a vantagem da obtenção imediata de valores e de provocarem uma menor perturbação do solo no local da medição. Como se trata de medições pontuais, os resultados obtidos por estes métodos podem não ser inteiramente representativos caso haja variações temporais significativas. Envolvem a extracção de amostra de gás do solo que é bombeada para um detector. A detecção é feita geralmente através da cintilometria em câmaras de sulfureto de zinco. Outro método de detecção utiliza câmaras de ionização, menos usado que o anterior por ser afectado pela humidade presente no gás extraído do solo. O princípio usado neste método relaciona-se com o facto de um gás ionizado como o radão ser um bom condutor eléctrico.

Tudo o que adianta será descrito reactivamente ao radão nas habitações, poderá ser generalizado para outros tipos de edifícios não residenciais, com as necessárias adaptações. O radão que migra para o interior das habitações provém de três fontes principais: as rochas e solo sobre os quais está construída, os materiais de construção e a água.

O transporte de radão para o interior das habitações através da água de consumo doméstico só tem relevância se a habitação for abastecida por água proveniente de furos próprios e localizados em rochas ou solos produtores de radão. Ao ser aquecida ou agitada, a água pode libertar o radão dissolvido estimando-se que se tiver 370kBq.m^3 de radão dissolvido fará aumentar a concentração de radão no interior da habitação em aproximadamente 37 Bq.m^3 (LAO,1990).

Esta libertação pode ocorrer durante as mais banais actividades domésticas que envolvam a agitação da água, como lavagens ou banhos. Segundo o autor atrás referido, a lavagem de louça é a actividade doméstica que mais radão liberta. No caso da habitação ser fornecida pelo sistema público de abastecimento, a contribuição da água para a concentração interior de radão será quase nula, visto que um dos processos usuais no tratamento de água pelas entidades fornecedoras envolve a agitação da água, libertando no momento a quase totalidade do radão eventualmente dissolvido.

A contribuição dos materiais de construção para a concentração de radão no interior das habitações é, na maior parte das vezes, diminuto. Nas casas construídas a partir de materiais muito radioactivos, como por exemplo materiais de escombrelas de minas de urânio ou rádio, os materiais de construção podem, no entanto, ter uma construção não desprezável.

A maior fonte de radão nas habitações é, sem dúvida, o solo ou substrato rochoso sobre o qual assentam as fundações do edifício. Estima-se que a concentração de radão no interior das habitações corresponde a 0,6 a 10% (média de 1%) do radão existente no solo envolvente (GUNDERSEN, 1989). Quantas mais vias abertas para o solo estiverem disponíveis maiores serão a concentração do radão no interior. O mecanismo essencial que leva à entrada do radão nas habitações está relacionado com transporte por convecção, i.e., o motor da ascensão do radão a partir do solo são as diferenças de pressão entre o interior da habitação e a atmosfera do solo. Estas diferenças de pressão devem-se, na sua maioria, a fenómenos relacionados com diferenças térmicas entre o interior e o exterior. No Inverno as casas são aquecidas interiormente originando uma diferença de temperatura entre o interior da habitação e o ar exterior. O ar interior, quente, tem tendência a subir provocando pressões negativas nas partes inferiores dos edifícios, o que origina uma ascensão do radão desde o solo até ao interior da habitação. O vento também pode provocar diferenças de pressão entre o interior e o exterior dos edifícios. O lado da habitação exposto ao vento tem pressões elevadas no exterior, pelo que o gás tende a

movimentar-se desde o solo para o interior da habitação. No lado oposto da habitação tende a ocorrer o inverso.

As concentrações de radão no interior das habitações são, pelas causas atrás referidas, tendencialmente mais elevada no inverno que no verão. Segundo Teixeira e Faísca (1992), para mesma habitação, as concentrações de radão no inverno podem ser duplas das verificadas no verão. Dentro da habitação o radão tende a acumular-se nos níveis interior, pelo que as concentrações mais elevadas serão registadas nas caves ou nos picos térreos (Lao 1990; Teixeira e Faísca 1992); Brill (1994) adianta que nos picos inferiores (cave ou rés-do-chão) as concentrações serão de dois ou três vezes mais elevada que nos picos superiores.

O facto de existirem espaços vazios entre o solo e as partes habitadas do edifício podem ser um factor de redução da concentração no interior das habitações, visto poder actuar como uma zona tampão entre o solo e as partes habitadas, principalmente se forem ventiladas. A ventilação e a climatização das habitações assumem um papel fundamental no controlo das concentrações de radão no interior das habitações. Se a climatização for assegurada pela extracção de ar para o exterior geram-se pressões negativas no interior provocando um acréscimo no volume de radão proveniente no subsolo. Pelo contrário, se a climatização foi feita através da injeção de ar do interior serão geradas pressões positivas no interior que podem bloquear entrada do radão do subsolo, ao mesmo tempo que se procura uma diluição nas suas concentrações pela mistura com o ar exterior. Ao calafetar as habitações reduzem-se as trocas de ar com o exterior, pelo que as habitações mais eficientes do ponto de vista energético tendem a exhibir concentrações de radão 5 vezes mais elevadas que as menos eficientes (LAO, 1990). Pelo atrás exposto se depreende que os hábitos e modos de vida dos ocupantes das habitações é um factor importante, pois para reduzir as concentrações do radão no exterior poderá, na alguns casos, ser suficiente a abertura frequente de portas e janelas.

Nos Estados Unidos as concentrações de radão no interior das habitações variam desde os 37 Bq.m³ aos 111 kBq.m³, com valores médios próximos dos 37 a 74 Bq.m³ (OTTON, 1992). Estudos realizados por vários autores mostram que as médias da Grã-Bretanha são algo inferiores, com concentrações médias em Inglaterra e País de Gales de 21 Bq.m³, e de 16 Bq.m³ na Escócia (APPLETON BALL, 1995). A concentração média na Bélgica e na Suécia é estimada em ca. 50 Bq.m⁻³ (GENICOT VANMARCKE, 1992 e SWEDJEMARK MAKITALO, 1990).

As medições feitas em Portugal, desde 1986, revelam concentrações de radão que variam desde 6 Bq.m³, a 3 kBq.m³. Estes resultados, publicados por FAÍSCA et al. (1992) e por TEIXEIRA & FAÍSCA (1992), tem origem em determinações efectuadas

em todo o território Português, o que permitiu aos autores referidos estimarem as médias geométrica de radão a nível nacional em 37 Bq.m^3 .

Ainda segundo os mesmos autores, é notória uma relação entre elevadas concentrações de radão nas habitações e presença de substratos de natureza granítica. A distribuição espacial das médias geométricas das concentrações de radão nas habitações indica que os valores são inferiores na zona sul e litoral, e ainda no distrito de Bragança. No distrito do Porto a concentração media é de 41 Bq.m^3 e no de Braga atinge 57 Bq.m^3 . Mais elevados são os valores nas regiões predominantemente graníticas, atingindo concentrações médias de 100 Bq.m^3 para o distrito de Viseu, e de 120 Bq.m^3 no distrito da Guarda. Considerando os resultados agrupados ao nível concelhio foram detectadas médias geométricas de 7 a 200 Bq.m^3 , com destaque para os concelhos da guarda (507 Bq.m^3), de Nelas (408 Bq.m^3), e arcos de Valdevez (243 Bq.m^3). No concelho de Castelo Branco a média geométrica atinge os 148 Bq.m^3 , com um intervalo de variação de 40 a 1030 Bq.m^3 (TEIXEIRA & FAÍSCA, 1989).

2.4.1.2 Origem Cósmica

Os radionuclidos cosmogénicos são continuamente formados na atmosfera através da interacção da radiação cósmica, altamente energética, com gases atmosféricos, os raios cósmicos. Ao colidirem com os átomos da atmosferas, geram uma “cascata” de neutrões e de protões que interagem com núcleos leves de carbono, azoto e de oxigénio, os quais se desintegram formando novos elementos, incluindo isótopos radioactivos.

São inúmeros os radionuclidos que têm vindo a ser observados desde a década sessenta. Mas aqueles que apresentam taxas de produção mais elevada e que são os mais significativos do ponto de vista de dose para a população, são o ^3H (trítio), o Be, o ^{14}C e o ^{22}Na (UNSCEAR, 1993). Apesar de serem originados de forma idêntica, estes radionuclidos apresentam comportamentos geoquímicos distintos.

Cerca de 90% do ^3H produzido na atmosfera é convertido em água triturada (HTO), entrando directamente no ciclo da água. O ^{14}C , quando oxidado, forma o ^{14}CO , o qual participa nos processos de transferência entre a atmosfera e a biosfera. Pelo contrário, o ^{22}Na e o Be associa-se rapidamente às partículas de aerossol disponíveis na atmosfera, passando a tomar parte em todos os processos atmosféricos a que estas se encontram sujeitas

2.4.2. Fontes artificiais de radiação

As principais fontes artificiais de radiação estão directamente ligadas à actividade médica. Como já foi mencionado, esta actividade utiliza certos tipos de radiação como meio de diagnóstico (o caso dos raios – X) ou como meio de tratamento (o caso da radioterapia). Em termos de contribuição para a radiação total, a radiação médica representa cerca de 15%, em média.

Para além disso, outras fontes artificiais podem ser levadas em conta, como sejam os casos das centrais nucleares de produção de energia ou os testes nucleares ligados à actividade militar. Globalmente, a contribuição destas fontes não ultrapassa 1% da radiação total UMSCHPS (1994), embora, em situações particulares, possa localmente atingir franjas da população com doses maciças de radiação (por exemplo, como consequência de fugas de radiação em centrais nucleares).

Segundo a UMSCHPS (1994), o contributo antrópico tem vindo a decrescer, acompanhando a redução dos testes nucleares, que foi imposta pelos acordos internacionais. De acordo com esta Instituição, os principais radioisótopos produzidos pela actividade humana são o ^3H ($T_{1/2}$ 12,3 anos), o ^{121}I ($T_{1/2}$ = 1,57x10 anos), o ^{137}Cs ($T_{1/2}$ = 30,17 anos) e o ^{90}Sr ($T_{1/2}$ = 28,78 anos). Todos eles são gerados em testes nucleares e em reactores de fusão. O ^{131}I ($T_{1/2}$ = 8,04 dias) é utilizado em tratamentos da tiróide, sendo também um importante radioisótopo produzido pela actividade humana. O Tc ($T_{1/2}$ = 2,11x10 anos) resulta do decaimento do Mo, o qual é utilizado em diagnósticos médicos e o ^{239}Pu ($T_{1/2}$ = 2,41x10 anos) resulta do bombardeamento com neutrões do ^{23}U .

É importante acrescentar que, um outro, mas bastante mais pequeno contributo para a radiação total, é dado pelas ondas electromagnéticas produzidas pelo homem, nomeadamente as ondas de rádio e as ondas de televisão. Trata-se, contudo, de radiação de baixa energia, não ionizante e com baixa perigosidade.

2.5. Efeitos biológicos da radioactividade

A actividade de uma substância radioactiva é determinada pelo número de transformações que ela sofre por unidade de tempo. A unidade internacional estabelecida para medir essa grandeza, denominada Curie (Ci), define-se como a quantidade de substância radioactiva que produz o mesmo número de desintegrações que um grama de rádio e equivale a $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo.

A radiação gama, de efeitos extremamente nocivos para a vida, mede-se em röntgen (R), como os raios X. Essa unidade é definida como a quantidade de radiação capaz de produzir um determinado número de iões (átomos com carga eléctrica) numa certa

quantidade de ar, sob condições fixas de temperatura e pressão. O rad é a unidade de medida de exposição local à radiação e equivale a cem ergs por grama.

O efeito biológico causado pela irradiação prolongada do corpo humano avalia-se segundo o factor de qualidade da radiação (Q), que estabelece quantas vezes o efeito biológico causado por um dado tipo de radiação excede aquele provocado pela radiação gama de mesma dose. A dose equivalente (DEQ), cuja unidade é o rem, define-se como a quantidade de radiação que causa o mesmo efeito biológico que uma dose de um rad de raios X ou radiação gama.



Fig. 2.8. Efeitos da radioactividade na pele (www.colaweb.com).

O limite aceitável de radioactividade para o corpo humano é de aproximadamente meio rem por semana (www.colaweb.com). A tolerância de radioactividade varia ligeiramente entre os organismos vivos, mas uma dose generalizada de centenas de rem ocasiona sempre graves lesões e mesmo a morte. A administração local de uma radiação de milhares de rem, porém, contribui para eliminar tumores de pele e de outros órgãos do corpo.

- Em quantidades elevadas, são nocivas aos tecidos vivos, causam grande perda das defesas naturais, queimaduras e hemorragias. Também afectam o DNA, provocando mutações genéticas.

-Efeitos eléctricos: o ar atmosférico e gases são ionizados pelas radiações, tornando-se condutores de electricidade.

A radiação danifica os tecidos vivos, de modo que as pessoas que trabalham com material radioactivo devem ser protegidas. Os raios alfa e beta são absorvidos mais facilmente, mas os raios gama são muito mais penetrantes. Os elementos de núcleo atómico alto absorvem melhor os raios gama, em comparação com os de baixo número atómico. A radiação em excesso pode causar cancro, a multiplicação acelerada e desenfreada de células de certas regiões do corpo. Os efeitos biológicos

da radiação são diversos, entre eles o desenvolvimento de tumores, leucemia, queda de cabelo, redução na expectativa de vida, indução à mutações genéticas, malformações fetais, lesões de pele, olhos, glândulas e órgãos do sistema reprodutivo. São de há bastante tempo conhecidos os efeitos nefastos que a exposição à radiação pode procurar nos seres vivos. O efeito da dose de radiação absorvida pode ser imediatamente detectada se for intensa e atingir a maioria do corpo humano. No entanto, a exposição do organismo a doses mais reduzidas, mas prolongada no tempo, também poderão ser fatais a longo prazo.

Entende-se por dose absorvida a quantidade de energia efectivamente absorvida por qualquer material, e é medida em Rad (E.U.A) ou Gray (sistema internacional). O Gray (Gy) pode ser usado para medir qualquer tipo de radiação ou qualquer material, e corresponde a 1 joule de energia absorvida por 1 quilograma de matéria. Um gray equivale a 100 rad.

Usando o Gray para medir a dose absorvida não é possível descrever os efeitos biológicos dos vários tipos de radiação. Para relacionar a dose absorvida por um tecido humano com os reais danos biológicos causados, é necessário considerar uma outra quantidade, a chamada dose equivalente que é expressa em sieverts (Sv) no Sistema Internacional, ou em Rem nos Estados Unidos (1 sievert equivale a 100 rem). Como os vários tipos de radiação podem gerar efeitos biológicos diferentes para a mesma dose absorvida (Gy) multiplica-se este valor por um factor de qualidade (Q) que é específico para cada tipo de radiação. Para a radiação gama o factor de qualidade é 1, enquanto para a radiação alfa toma o valor 20 (APPLETON & BALL, 1995). Este enorme peso no caso da radiação alfa tem a ver com o seu menor poder penetrativo na matéria, i.e. com o facto de toda a energia ser dissipada muito rapidamente num reduzido volume de tecidos humanos.

Os órgãos humanos e os tecidos que os constituem não reagem da mesma forma à radiação recebida. As radiações γ e β provocam menores danos por serem mais penetrativas no organismo, dissipando a sua energia num maior volume de tecidos. A radiação α pode ser travada pela roupa ou pela pele, pelo que pode provocar na pele danos consideráveis. Mas se a emissão de partículas α se processar no interior dos pulmões provoca danos maiores nos tecidos do epitélio pulmonar. Este efeito no epitélio pulmonar é potenciado pela acção dos isótopos descendentes do radão. Apesar do radão ser um gás inerte e sem carga eléctrica, os seus descendentes na cadeia de decaimento possuem carga eléctrica e podem associar-se a pequenas partículas de poeira existentes no ar e ser inalados. Uma vez no interior dos pulmões, estas partículas podem aderir ao revestimento do pulmão e continuar a emitir partículas α no interior do próprio epitélio pulmonar.

Para além dos pulmões, reveste-se de particular importância a susceptibilidade que a medula óssea e as gónadas exibem face à radiação. Dada esta diferença de comportamento dos tecidos humanos, foi definida uma nova quantidade, a *dose equivalente efectiva*. Trata-se de calcular para cada tecido o produto da sua dose equivalente por um factor de risco ponderado, que é específico para cada tipo de tecido. A dose equivalente efectiva será a soma de todas as parcelas assim obtidas.

Os mecanismos através dos quais a radiação afecta os tecidos humanos não são hoje compreendidos na sua totalidade. Admite-se que os danos biológicos são causados pela destruição das ligações químicas nas moléculas celulares através da ionização. À medida que as ondas electromagnéticas de alta energia (radiação γ , raios-X) ou partículas de alta velocidade (partículas α e β) atravessam as células, vão arrancando electrões às moléculas e átomos ao longo da sua trajectória.

Estes átomos e moléculas ficam carregados positivamente, enquanto os electrões libertados se podem ligar a outros átomos ou moléculas carregando-os negativamente, formando pares de iões positivos e negativos. Estima-se que de cada vez é formado um par iónico, as partículas ou ondas electromagnéticas que constituem a radiação perdem em média 34 eV de energia. Ao perder energia, as partículas são desaceleradas enquanto a radiação γ e os raios-X sofrem um aumento do comprimento de onda. Quanto maior o número de pares iónicos formados menor será a distância percorrida pela radiação.

Os raios-X e a radiação γ podem passar através de uma pessoa sem perder muita energia. Uma partícula β com 2 MeV de energia (em média), é capaz de penetrar 1 cm em tecidos humanos gerando ao longo da trajectória 60 000 pares iónicos, ou seja cerca de 60 pares por célula. No entanto, uma partícula α típica (5.5 MeV) pode atravessar 40 μm , o correspondente à espessura aproximada de quatro células, e nesse trajecto formar 160 000 pares iónicos, *i.e.* 40 000 pares por célula.

Dado que a maior parte das moléculas que constituem o corpo humano são de água, serão estas as mais afectadas pela ionização. Por este meio, as moléculas de água serão dissociadas originando um radical livre (OH) e um átomo de hidrogénio. Estas substâncias são muito reactivas e podem quebrar as cadeias proteicas e as cadeias de DNA, para além de afectarem o equilíbrio químico da célula (LAO, 1990). Quando as perturbações nas ligações químicas das moléculas de DNA são muito grandes, e quando o número de cortes nas cadeias de DNA são numerosas, podem ocorrer aberrações cromossómicas. Os danos nos cromossomas podem causar a morte de uma célula ou suprimir a capacidade da célula se dividir ou de se reproduzir normalmente. O período de tempo entre a indução do cancro do pulmão e o

aparecimento da doença, o chamado período de latência, pode variar de 5 a 50 anos (LAO, 1990).

A relação entre o cancro do pulmão e o radão já começou a ser estabelecida nos anos 50 quando se realizaram vários estudos em minérios. DONALDSON (1969), conclui que 50% da morte dos minérios nas minas de urânio em Schneeberg (Alemanha) e Joachimsthal (República Checa) se deviam a cancro do pulmão, e que a principal causa de cancro seria a grande quantidade de radão inalado (197 kBq.m^{-3} em média). Mais tarde, outros estudos (HORNUNG & MERINHARDT, 1987; KUSIAK et al., 1993; LUBIN et al., 1995) vieram confirmar a ligação casual dos cancros do pulmão à exposição dos minérios a concentrações elevadas de radão. Todos estes estudos apontam para que a percentagem de cancros de pulmão provocados pelo radão, se cifre em cerca de 40%.

Se parece clara a relação entre o radão e o cancro do pulmão quando se consideram altas concentrações, o mesmo já não acontece quando se tenta verificar a existência da mesma relação para concentrações mais reduzidas, por exemplo aquelas às que as pessoas estão expostas no interior das suas habitações. O grande debate actual sobre esta matéria entre os vários autores relaciona-se com a existência ou não de risco quando se consideram concentrações diminutas. Enquanto a matéria dos autores concluem que poderá bastar uma partícula α para desencadear o processo que conduz à formação do cancro (NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, 1998), outros existem (COHEN, 1995) que consideram haver um limite nas concentrações, abaixo das quais não existe risco.

Usando os dados fornecidos pelos estudos epidemiológicos em mineiros em conjugação com outros estudos realizados na população em geral, tem sido possível estabelecer a relação entre o cancro do pulmão e as concentrações de radão nas habitações. Assim, LUBIN *et al.* (1995) estimam que entre a generalidade da população norte-americana, 10% das mortes por cancro do pulmão são devidas á exposição ao radão no interior das habitações, o que corresponde a cerca de 15 000 mortes/ano. Na Grã-Bretanha, METTERS (1992) estima que para uma concentração média de 20 Bq.m^{-3} o risco de contrair cancro do pulmão durante a vida é de 3 em 1000, aumentando para 30 em 1000 se a concentração média for de 200 Bq.m^{-3} . Dado que existe uma relação de sinergia entre o radão e o consumo de tabaco na geração do cancro (TAYLOR, 1997;APPLETON & BALL,1995), o risco de contrair cancro do pulmão por fumadores sobe para 10 em 1000 e 100 em 1000, respectivamente para concentrações média de 20 e 200 Bq.m^{-3} (METTERS 1992).

As estimativas mais recentes do risco devido ao radão, foram publicadas no relatório final “Biological Effects of Ionizing Radiation – BEIR VI” produzido por um comité de especialistas designado pela Academia de Ciência dos E.U.A. (NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, 1998). Este comité concluiu que 1 em 10 ou 1 em 7 mortes por cancro do pulmão podem ser atribuídas ao radão, tanto para fumadores como para não fumadores. Esta estimativa equivale a 15 400 a 21 800 mortes anuais nos E.U.A. provocadas pelo radão. O incremento do risco de cancro do pulmão em resultado da exposição ao radão no interior das habitações, relativamente á exposição às concentrações normais no interior, é apresentado na(tabela 2.5).

Tabela 2.5 - Intervalo de variação estimado para o risco relativo, ao longo da vida, de contrair cancro do pulmão devido a exposições ao radão no interior das habitações (adaptada de NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES,1998).

Exposição Bq.m ⁻³	Homens		Mulheres	
	Fumador	Não fumador	Fumador	Não fumador
25	1.054-1.081	1.130-1.194	1.059-1.089	1.137-1.206
50	1.180-1.161	1.259-1.388	1.118-1.177	1.274-1.411
100	1.214-1.318	1.518-1.775	1.235-1.352	1.547-1.821
150	1.318-1.471	1.776-2.159	1.352-1.525	1.819-2.229
200	1.420-1.619	2.033-2.542	1.466-1.694	2.091-2.637
400	1.809-2.174	3.053-4.057	1.915-2.349	3.174-4.255
800	2.507-3.120	5.058-7.008	2.760-3.549	5.317-7.440

2.6. Legislação relativa ao gás radão

Face aos riscos relacionados, com a exposição ao radão no interior das habitações, vários países tem proposto valores limite para estas concentrações. São denominados “*action level*” ou níveis de actuação pois, para a concentração de superiores aos valores recomendados, aconselha-se intervir no sentido de reduzir os valores de radão no interior das habitações.

Não há uma uniformização da dose de segurança, o que justifica o facto de muitos países adaptarem valores diferentes na legislação. Os valores estabelecidos são variáveis consoante a realidade de cada país. Só para citar exemplos de alguns países:

No **E.U.A** a Enviromental 4pci/ (148 Bq.m³). Este valor foi estabelecido com o entendimento de que a partir destas concentrações os riscos de contrair cancro do pulmão são já merecedores de atenção ao ponto de se justificarem iniciativas para a redução das concentrações de radão.

Na Europa existe uma recomendação da comissão das comunidades europeias(90/143/Euratom; Comissão das Comunidades Europeias 1990) que define o nível de actualização em 400 Bq.m⁻³ para os edifícios existentes e 200Bq.m⁻³ para novos edifícios.

Em Angola, não existe nenhuma legislação relativa a radioactividade natural em especial, devido ao facto de ainda não se terem efectuado estudos sobre o tema de forma muito ampla ou profunda. Os únicos estudos que se fizeram são bastante recentes, tendo sido levados a cabo por um grupo de três estudantes que concluíram o curso de Mestrado na Universidade de Coimbra. A abrangência destes trabalhos não cobre uma área muito significativa do país.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO

3.1 - Geográfica e Administrativa

O Município da Catumbela localiza-se a Sul do Equador ocupando uma parte sudoeste da Província de Benguela. Confina a Norte com a cidade do Lobito a Sul com a cidade de Benguela, a Este com a comuna do Biópio e a Oeste com o Oceano Atlântico (Fig.3.1). Dista 8 km da cidade de Lobito e 22 km da cidade de Benguela, com coordenadas geográficas: 12° 20' de latitude sul e 13° 30' de longitude leste, tendo uma extensão superficial de 552 Km², com uma população estimada em 136.000 habitantes. Segundo informações obtidas junto da sua Administração, Catumbela foi o nome do primeiro soba da localidade, baptizando-a, assim, com o seu nome. Do mesmo modo, passou a designar-se o rio que a atravessa (Valongo, 2000).

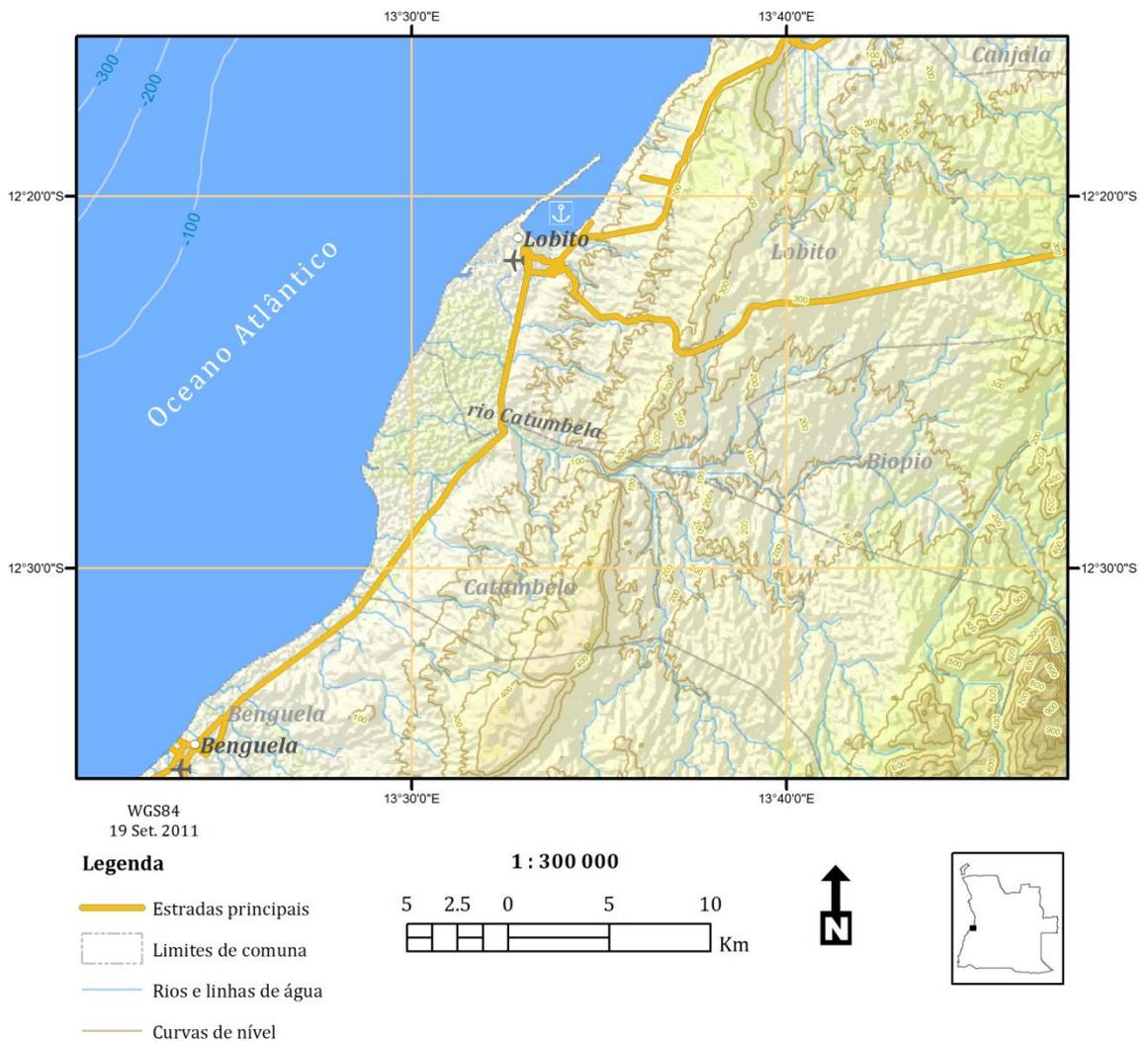


Figura. 3.1 - Enquadramento da área em estudo

3.2 - Geomorfologia e Hidrografia

Em relação ao relevo pode-se dizer que Angola apresenta um maciço de terras altas, limitado por uma faixa estreita de terra baixa, na costa, que varia entre 0 e 200 metros (Fig.3.2). Acima dos 200 metros encontram-se as pequenas montanhas e os planaltos, que vão aumentando gradualmente de altitude, até atingir o Planalto Central, cujas altitudes médias variam entre 1 200 e 1 600 metros.

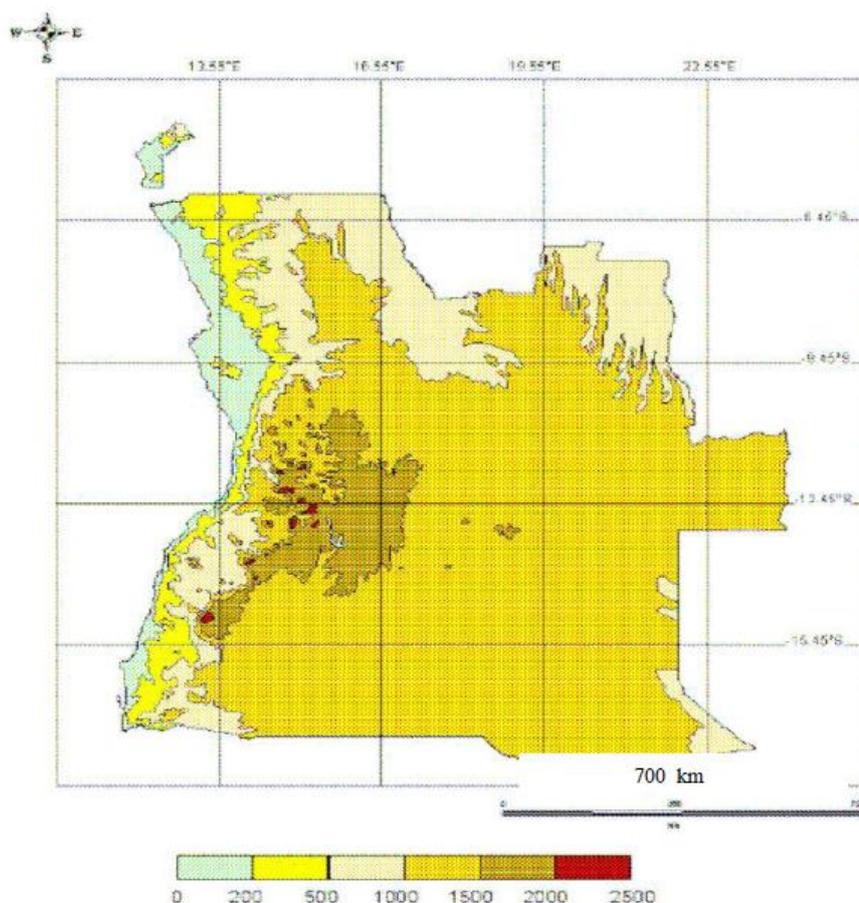


Figura 3.2 - Distribuição das altitudes (m) em Angola (CEP, 2006).

Do ponto de vista geomorfológico a região estudada neste trabalho enquadra-se na zona da faixa litoral (Galvão & Silva, 1972), com uma largura de 10 a 20 km e altitudes de 0 a 500 m (Comissariado Provincial de Benguela, 1990), que se estende ao longo de toda a costa de Angola e onde afloram geralmente rochas sedimentares do Mesozóico ao Holocénico, constituindo uma planície marítima típica (Galvão & Silva, 1972).

Para além desta zona geomorfológica consideram-se, ainda, duas outras zonas, que reflectem basicamente a geologia presente: uma faixa central, definida como uma superfície em depressão, constituída por rochas gneisso-migmatíticas e xistos do designado em Galvão & Silva (1972) por *Complexo Metamórfico*, situada

para leste e grosseiramente paralela à primeira, com uma largura compreendida entre os 15 e os 20 km () e altitudes entre 200 e próximo de 1 000 m, nalguns pontos. Mais para o interior, define-se uma terceira zona geomorfológica, constituída por rochas magmáticas, caracterizada por um rejuvenescimento do relevo (Galvão & Silva, 1972) e pelas altitudes mais elevadas da província de Benguela, com cotas superiores a 1 000 m (figura 3.1).

Entre o Lobito e Benguela, estende-se a região com cotas mais baixas, entre 3 e 6 m, associada à planície deltaica do rio Catumbela, com sedimentos areno-argilosos; uma faixa arenosa separa esta zona das praias actuais (Galvão & Silva, 1972). O limite entre a planície costeira e as unidades do Cretácico destaca-se no terreno devido a uma escarpa de falha, que pode ser identificada na carta topográfica, e que dá origem a uma morfologia aplanada à volta da cota de 100 m, (Galvão & Silva, 1972). As cotas aumentam gradualmente para leste, até se atingirem novas escarpas de falha. O relevo nesta região caracteriza-se, assim, como regra, por formas lisas e suaves e, nalguns locais, paredes abruptas.

Quanto ao clima, a região é caracterizada por ter um clima megatérmico, quente e semi-árido. A temperatura média anual é cerca de 23-24 °C; a pluviosidade anual é cerca de 200-400 mm, mas a humidade relativa do ar atinge 75-80% e o número de dias de precipitação varia entre 21 e 60 mm. A estação chuvosa decorre de Novembro a Março e a época quente de Novembro a Abril. A média anual das temperaturas mínimas é 18-20 °C, a amplitude térmica é cerca de 6-7 °C e a temperatura média do mês mais quente é 29 °C.

Tendo em conta estas condições climáticas, a vegetação é escassa atendendo ao tipo de solo sedimentar existente nas bermas do rio. É principalmente herbácea, popularmente conhecida como capim, onde se inclui grande parte das gramíneas. Contudo, as aluviões do rio são usadas para agricultura. (Mariano Feio, 1946, Castanheira Diniz, 1998).

3.3- Enquadramento geológico regional

A área estudada abrange uma grande variabilidade de unidades e rochas, entre ígneas, metamórficas e sedimentares. Diversos autores, tais como Galvão & Portugal (1971), Galvão & Silva (1972), Starck *et al.* (1991), Buta-Neto *et al.* (2006), Tavares (2006), Tavares *et al.* (2007), Quesne *et al.* (2009), Guiraud *et al.* (2010), têm contribuído para o conhecimento geológico da região. Uma das principais contribuições corresponde à cartografia realizada na região do Lobito (Galvão & Portugal, 1971; Galvão & Silva, 1972). Da leitura da Folha nº 227/228 da carta

geológica do Lobito (Galvão & Portugal, 1971), apresentada na (Fig.3.3) Ressaltam três sectores geológicos bem distintos, que correspondem, de alguma forma, aos três sectores geomorfológicos acima citados. Em termos temporais, a geologia da região engloba um intervalo temporal compreendido entre o Precâmbrico e o Recente. Considerando uma leitura de oriente para ocidente:

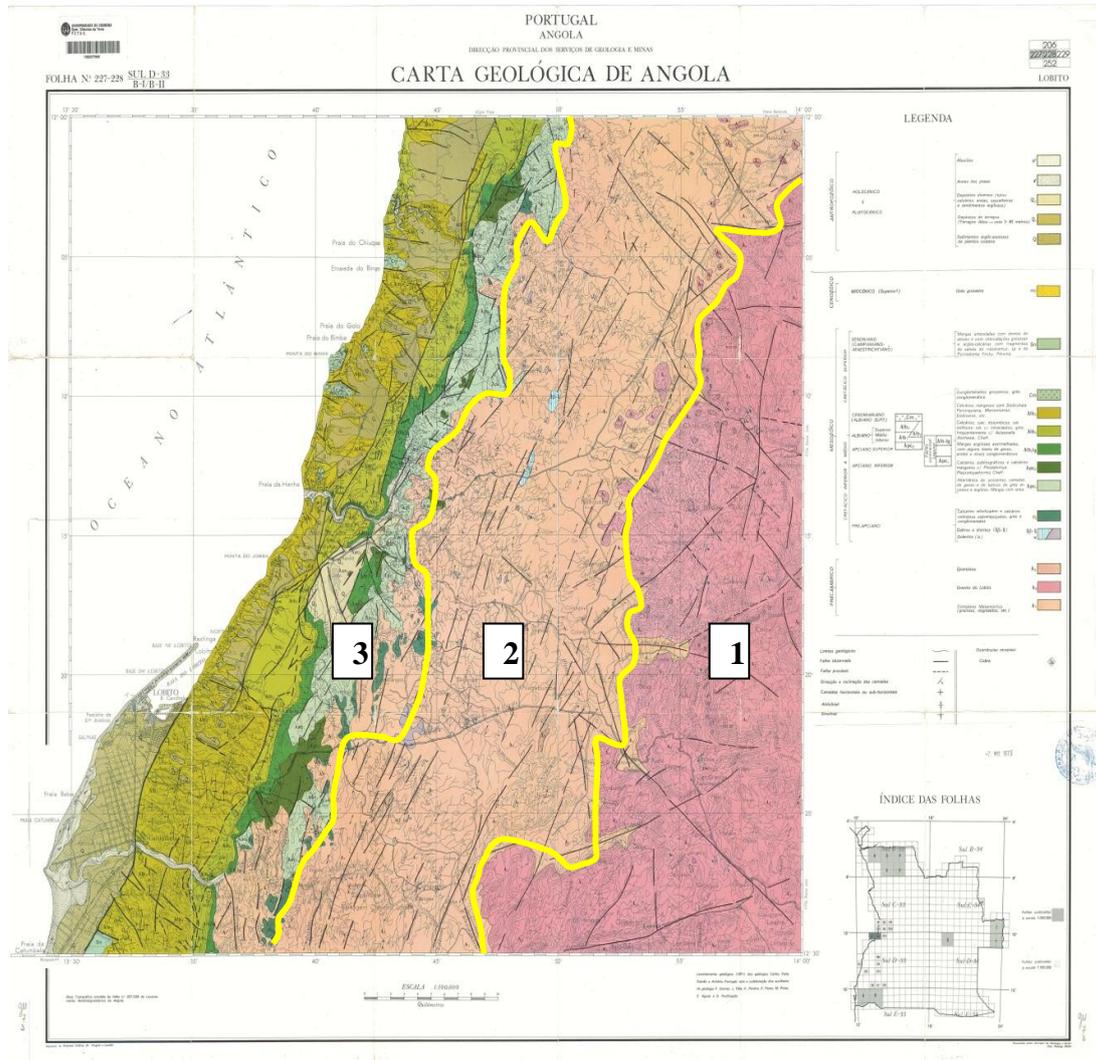


Figura. 3.3 – Folha 227-228 da Carta Geológica de Angola, à escala 1: 100.000 (Galvão & Silva 1972).

O primeiro sector corresponde a rochas graníticas e granitóides da faixa oriental, com uma idade compreendida entre a base do Aptiano e a idade das rochas do Complexo Metamórfico, aflorantes no sector intermédio. Constitui um sector muito pouco estudado.

Um segundo sector, designado por Complexo Metamórfico, ocupa uma área abatida entre as rochas graníticas da faixa oriental e as rochas sedimentares a ocidente. É composto por gneisses, migmatitos e rochas xistentas.

O terceiro sector corresponde à faixa que se estende de Norte a Sul, junto à costa, formada por rochas sedimentares evaporíticas, siliclásticas e carbonatadas, cujas idades vão desde a base do Aptiano (talvez mesmo do Barremiano) até ao Quaternário. Esta área que tem sido considerada como Bacia de Benguela, que ostenta uma certa sequência da Bacia do Kwanza, a norte (Fig.3.4). Embora com diferença de fácies, estão presentes as mesmas unidades estratigráficas da Bacia do Kwanza (Fig. 3.5). O limite entre estas duas bacias é algo arbitrário (Antunes, 1964), mas já Mascarenhas (1961) o fixa no paralelo de 11°S e 13° 25'S. O limite austral situa-se nas proximidades do Cabo de Santa Maria, onde o Complexo de Base (Complexo Metamórfico) atinge a costa.

A Bacia de Benguela está separada parcialmente da Bacia do Kwanza desde o Cenomaniano, devido à génese de relevos submarinos da região do Sumbe (Marzoli *et al.*, 1999; Guiraud *et al.*, 2010). Os limites propostos das bacias correspondem às principais zonas de falhas oceânicas transformantes, comprovadas através da correlação com algumas bacias brasileiras (ver, por exemplo, Neto, 1958; Guiraud *et al.*, 2010). A sua largura no *onshore* é bastante reduzida, apresentando um máximo (aproximadamente de 25 km) nos arredores do Dombe Grande. Para norte, a largura diminui um pouco, até à proximidade da cidade de Benguela, daí em diante, começa de novo a aumentar. A sul do Dombe Grande, a altura diminui gradualmente até ao Cabo de Santa Maria (Fig.3.4) (Buta Neto, 1958).

Em termos litostratigráficos, a Fig.1.5 Resume toda a sucessão sedimentar e as respectivas formações, que caracterizam a Bacia do Kwanza (e, conseqüentemente, o enchimento da Bacia de Benguela).

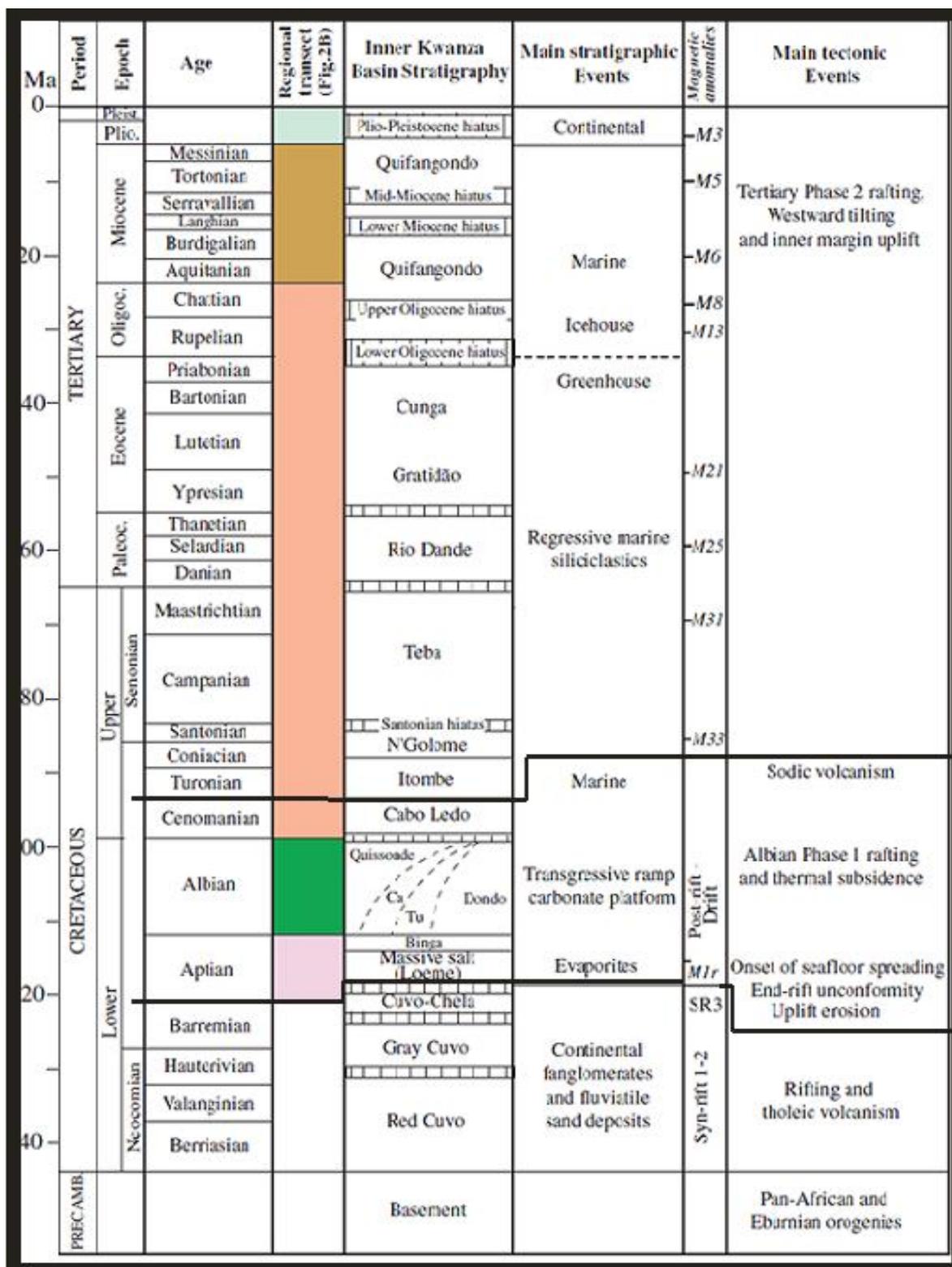


Figura.3.4 - Litostratigrafia e principais eventos tectônicos e estratigráficos da Bacia do Kwanza (segundo Guiraud *et al.*, 2010).

3.4. Caracterização geológica local

De acordo com o exposto em 3.3 definiram-se, do ponto de vista geológico, três grandes domínios (Galvão & Portugal, 1971; Galvão & Silva, 1972) (Fig.3.3) tendo 2 deles sido estudados no presente estudo. De seguida, faz-se uma caracterização litológica e estrutural das diversas unidades observadas, desde as rochas ígneas e metamórfica até às unidades compostas por rochas sedimentares mesozóicas.

3.4.1 Granitos e Rochas Granitóides (Granito do Lobito)

De acordo com a figura que define a área estudada a mancha correspondente às rochas graníticas, trata-se de rochas pertencentes ao conjunto de idade Eburniana do Cratão Angolano. Em particular, o granito do Lobito é predominantemente de grão médio a fino, textura xenomórfica granular, apresentando localmente aspecto cataclástico. As variações mineralógicas no conjunto permitem a identificação de granodioritos e quartzo dioritos. Aparecem também quartzitos que ocorrem na bordadura da escarpa que separa as unidades do Complexo Metamórfico das rochas granitóides (Galvão & Silva, 1972).

3.4.2 Complexo Metamórfico:

Este complexo é do tipo milonítico e inclui gnaisses, granitos-gnáissicos, migmatitos e xistos, sendo provavelmente as rochas de idade mais antiga dentro da geologia regional, consideradas do Precâmbrico (Arcaico, Paleo e Mezoproterozóico), fortemente afectadas pela orogenia Panafricana (Figura 3.5 e 3.6). Está cortado por diques de rochas diabásicas (doleritos) olivínicas, com textura subofítica, de direcção predominante NE-SW. (Galvão & Silva, 1972).



Figura 3.5 - Aspecto dos corpos gneisso-migmatíticos e da sua organização espacial.



Figura 3.6 – Aspectos das rochas que integram o Complexo Metamórfico

3.4.3 Unidades Sedimentares da Bacia de Benguela

De acordo com os diversos autores que trabalharam na Bacia de Benguela (Neto, 1958, in Quesne e tal., 2009), e tendo por base o quadro litostratigráfico apresentado na (Fig.3.5) foram reconhecidas no sector estudado as seguintes formações: Sal Maciço, Binga, Twenza, Catumbela e Quissonde. (Fig.3.7)

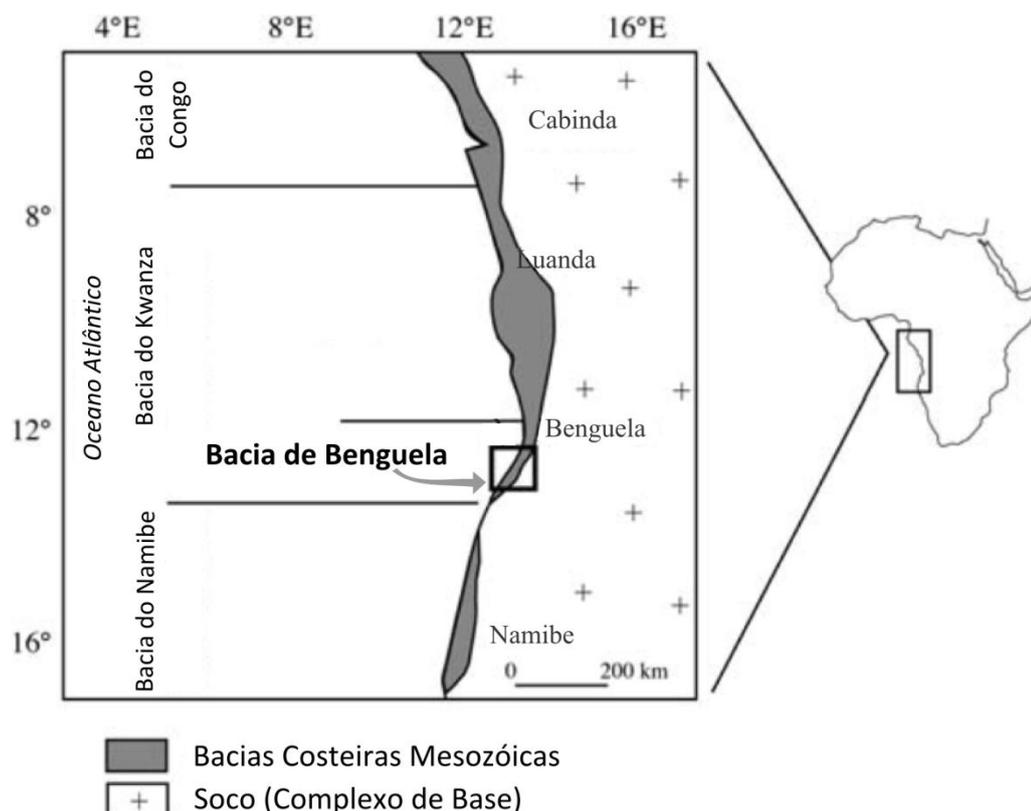


Figura.3.7 – Localização geográfica da Bacia de Benguela e sua relação com as bacias do Kwanza e do Namibe (in Quesne *et al.*, 2009).

Formação Sal Maciço (Apciano): é composta maioritariamente por gesso, lutitos, evaporitos e arenitos, apresenta-se de forma envelopada por anidrite e alguns níveis de argilas betuminosa. A base de sequência foi chamada de Sal Maciço para distingui-la de menor espessura que aparecem alternadas em níveis superiores. Sendo menores as viabilidades de ocorrer nos locais onde o bedrock está sobrevivendo, e sendo o meio de depósito ser menos favorável pode também ter ocorrido, visto o seu carácter plástico. Assenta sobre o Complexo Metamórfico. Na

carta geológica do Lobito nomeiam esta unidade Galvão & Silva (1972) como (**Apc1**). (Fig.3.8).



Figura. 3.8 – Vista geral e pormenorizada da Formação Sal Maciço

Formação Binga: Esta unidade assenta sobre a unidade Sal Maciço. Na área estudada é formada por diversos tipos de calcário, essencialmente oolítico, disposta concordantemente com a formação anterior. As camadas mostram uma espessura que pode atingir valores superiores a 1 metro, observando-se uma tendência vertical de aumento de espessura para o topo da unidade (estrutura estratocrescente). A(Fig.3.9) demonstra o aspecto genérico desta unidade. A carta geológica de Galvão & Portugal (1971) esta unidade está cartografada e designada como **Apc2**.

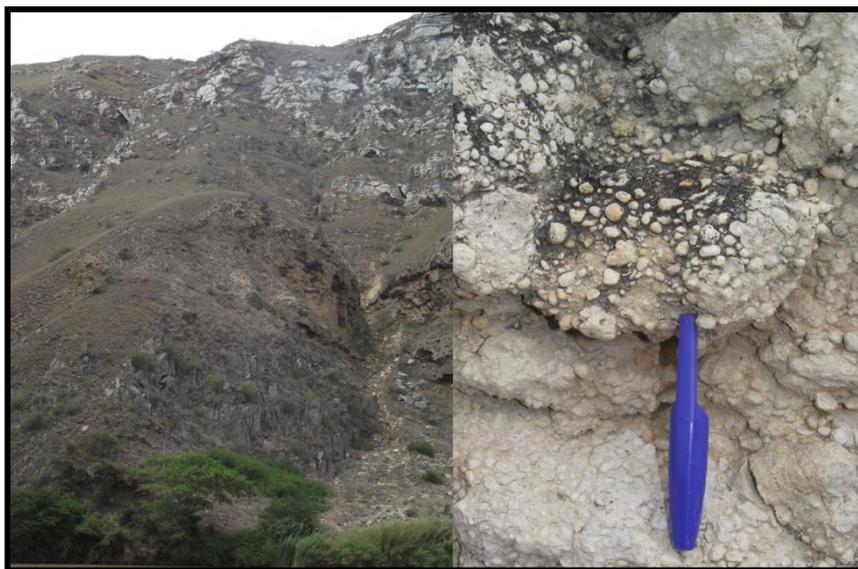


Figura.3.9. Pormenor de litologias pisolíticas dos calcários da Formação Binga.

Formação Twenza (Albiano): ao longo do sector estudado esta unidade corresponde a uma sucessão maioritariamente siliciclástica, composto por conglomerados, arenitos (grosseiros a finos) e lutitos, de cor vermelha e com fases de cimentação ferruginosa e carbonatada. Todavia, definem-se intercalações de arenitos de tonalidade mais esbranquiçadas, num conjunto alternante variável quanto ao grau de compactação. Esta variabilidade resulta do processo de cimentação. A fracção siliciclástica é dominada por grãos, maioritariamente angulosos de quartzo e feldspato. Esta unidade exhibe uma espessura máxima de 68 metros diminuindo gradualmente de espessura em direcção a oeste, onde desaparece, contactando a segunda unidade com a quarta.

Esta sucessão com características transgressivas traduz uma evolução do meio de sedimentação, de um ambiente salino confinado, até condições de mar franco (plataforma interna), Galvão & Silva (1972), consideram esta unidade como (**Alb1lg**) (Fig. 3.10). (Galvão & Silva, 1972; Starck *et al.*, 2001; Buta-Neto *et al.* 2006; Guiraud *et al.*, 2010).



Figura. 3.10. Aspecto genérico e pormenor da Formação Twenza.

Formação Catumbela (Albiano) – Ao longo do sector estudado esta unidade possui características faciológicas carbonatada calciclástica, maioritariamente oolítica e oncolítica. A fácies ocorre em porções que compreendem espessuras máximas de 1,5 metros, com atitude N18W;N54W e N41W, notando-se uma tendência vertical de incremento de espessura das camadas para o topo da unidade (sequência estratocrescente), (Fig.3.4). A espessura desta unidade é estimada em cerca de 350 metros, encontrando-se todo conjunto bastante fracturado.

Em outros sectores da bacia é composto por carbonatos marinhos, frequentemente dolomitizados, ricos em oolitos e bioclastos, os calcários desta formação existem em toda a bacia do Kwanza. Na bacia de Benguela, eles formam por vezes falésias de 300m de altura (sector da Catumbela). Eles são datados de Albiano. A Este passa aos depósitos de meio confinado da Formação Twenza e a Oeste a cunha deposicional e gradaciosamente para a Formação Quissonde. Os níveis de transição confinados com a Formação Twenza constituem potenciais níveis de rochas-mãe. Galvão & Silva (1972), codificam esta unidade como (**Alb2**) (Fig.3.11). (Galvão & Silva, 1972; Starck *et al.*, 2001; Buta-Neto *et al.*, 2006; Tavares, 2006; Guiraud *et al.*, 2010).



Figura 3.11. Formação Catumbela vista de forma genérica e em pormenor.

Formação Quissonde (Albiano) – ao longo do sector estudado, o contacto desta unidade com a unidade anterior caracteriza-se por uma série de dobras e falhas, impossibilitando determinar com precisão o ponto de contacto das duas unidades. Corresponde a uma unidade composta basicamente pela alternância entre camadas de calcário, margá e gesso, exibindo uma espessura de cerca de 75 metros. Em algumas porções definem-se películas gipsíferas estratiformes. As camadas encontram-se fortemente fracturadas, com espessura máxima de 50 metros, de cor cinzenta clara a escura. A atitude da estratificação anda à volta de N20W;2W.

Ao nível geral da bacia é essencialmente constituído por argilitos “d’offshore”, esta formação passa lateralmente aos carbonatos da Formação Catumbela. Por vezes, os argilitos repousam sobre os carbonatos da plataforma. Esta formação é rica em macrofaunas (amonites, échinides, gasteropodios) que permitem de a datar de

Albiano Galvão & Silva (1972), consideram esta unidade como (**Alb3**). (Fig.3.12) A esquerda, vista panorâmica do sector composto pela alternância entre calcário, marga e gesso, a direita vista pormenorizada do sector composta apenas por calcário e marga. (Galvão & Silva, 1972; Starck *et al.*, 2001; Buta-Neto *et al.*, 2006; Tavares, 2006; Guiraud *et al.*, 2010).



Figura.3.12. Vista Geral e particular da Formação Quissonde.

3.5 - Tectónica regional

O estilo tectónico regional possui: dobramentos, que foram gerados por tensões epirogénicas; fracturas, que foram formadas devido a fenómenos extensionais e de subsidência; e acidentes diapíricos, que afetaram as camadas sedimentares de toda a zona, desde as do Cretácico Inferior às do Miocénico. Todos estes acontecimentos contribuem para que o estilo tectónico regional possa ser considerado muito confuso. (Galvão & Silva, 1971; Stark *e tal.*, 1991; Lavier *e tal.*, 2001).

As unidades do soco da bacia de Benguela terão sido afectadas por um sistema de falhas submeridionais que tiveram um papel importante na estruturação da bacia (Fig.3.3 folha 227-228 carta geológica de Angola). A direcção destes acidentes foi herdada na estrutura do soco Pré-câmbrico (Stark *et al.*, 1991). De acordo com Guiraud *et al.* (2010), a extensão *sin-rift* foi dominada pelas estruturas N-S a NNE, típicas do Cratão Eburniano, com o limite entre este e a faixa de milonitos Panafricanos a constituir a estrutura mais marcante da extensão. Estas falhas determinam a orientação geral da costa e da plataforma continental. Na área

adjacente a norte, o sector sul da Bacia do Kwanza, orientação NNW-SSE da maior parte das estruturas salíferas, mostra que a migração do sal-gema foi primitivamente aconselhada por estas profundas falhas submeridianas. Também terão sido estas estruturas através das quais se ergueu o magma basáltico, conferindo manifestações vulcânicas da área (Galvão & Silva, 1971; Stark *et al.*, 1991; Spathopoulos, 1996; Marton & Lehmann, 2000).

O traçado das falhas submeridianas é por vezes interrompido e interceptado por diversas falhas transversais NE-SW a E-W, associadas à orogenia Panafricana. Este fenómeno causa a compartimentação do soco em blocos falidos.

Ao longo da costa, a banda é relativamente estreita e constituída por formações sedimentares, que foram afectadas por um sistema de dobras com direcções aproximadas NW-SE. Há uma excepção na vizinhança do soco, a qual é uma zona onde as formações sedimentares têm tendência para se dispor com a direcção do contacto sedimentar-cristalino, isto é, com as direcções aproximadas NNW-SSE e N-S. No interior, a extensão ocupada por rochas sedimentares é limitada, pois estas foram muito afectadas pela erosão. A depressão existente nas rochas do complexo metamórfico demonstra claramente as suas marcas (Galvão & Silva, 1971; Stark *et al.*, 1991).

Na margem direita do rio Catumbela, junto às comportas, as camadas formam um sinclinal transverso, o qual é atravessado por um grande número de falhas. Ao longo de toda essa margem, podemos notar que as camadas afundam predominantemente para ocidente. Na base da série surge uma unidade calciclástica que é afectada por numerosas dobras mais pequenas.

Na zona leste, no local onde o vale do rio se amplia, podemos reparar que as camadas se encontram muito dobradas e fracturadas em ambas as margens.

4 - AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE RADIOACTIVIDADE NATURAL EM ROCHAS AFLORANTES NA REGIÃO DE CATUMBELA

4.1 Introdução

A avaliação dos níveis de radioactividade natural foi efectuada através da medição dos fluxos de radiação gama emitidos pelas rochas aflorantes.

4.2 Métodos e técnicas

Em diversas áreas ao longo das margens do Rio Catumbela, entre o Biópio (no interior) e a foz, na direcção geral de rumo aproximadamente E-W, foram medidos em 116 locais (ver figura.4.1) os valores da radiação emitida pelas rochas aflorantes. Para o efeito utilizou-se um equipamento portátil *AWARE Electronics*, modelo RM-80 acoplados a datalogger LCD- 90 Pro Micro-Controller (figura.4.2). O detector utilizado é de mica, do tipo Geiger-Muller, capaz de medir a quantidade de radiação alfa, beta e gama em que as suas partículas variam de acordo com a energia recebida no intervalo entre 27 a 100%. Os dados foram adquiridos em intervalos de 60s e os valores exprimem-se em contagem por minutos (cpm); a medição foi efectuada com o detector colocado directamente na superfície exposta da rocha tendo sido registados em simultâneo as coordenadas geográficas de cada local.

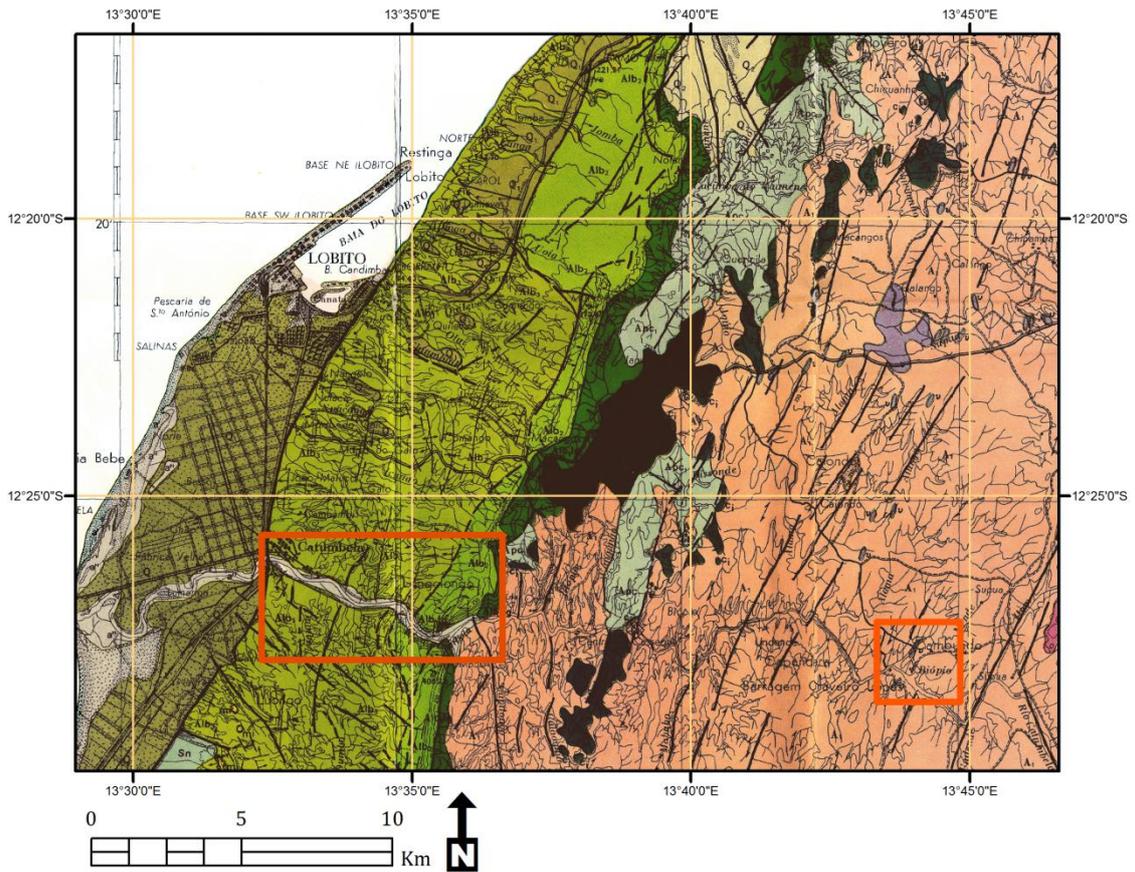


Figura.4.1. Ilustração dos locais de estudo na carta geológica do lobito (Galvão & Silva, 1971).



Figura.4.2. Aparelhos utilizados na recolha de dados no campo.

4.3 Resultados obtidos e sua discussão

O conjunto dos valores das medições obtido nas 3 unidades geológicas estudadas (Complexo metamórfico, Formação Quissonde e Formação Catumbela) expõe-se na (tabela 4.1) e visualiza-se graficamente no histograma da (figura.4.3) Verifica-se, assim, que, no total das 116 medições, cerca de metade têm valores inferiores a 60 cpm e em cerca de 2/3 dos casos os valores são inferiores a 70 cpm. Os restantes distribuem-se pelas diferentes classes verificando-se ainda que ocorrem valores de radiação gama superiores a 100 cpm em 5% dos casos.

Em síntese, pode concluir-se que a tendência dominante é a ocorrência de valores baixos de emissão de radiação gama embora com alguma dispersão para as classes de valores mais elevados. Esta dispersão dos valores pelas várias classes indica que a distribuição é algo heterogénea o que estará relacionado com a diversidade de rochas presentes na área em estudo (carbonatadas, detríticas, metamórficas, neste último caso, gneisses e migamatitos).

Tabela 4.1 – Valores de radiação natural (em cpm) obtidos nas três unidades geológicas estudadas.

M	P	Litologia	Radiação
8624346	342945	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	47
8624380	342966	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	65
8624366	343017	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	70
8624360	343036	Calcários, mangas, calcários argilosos, argilas	67
8624348	343071	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	63
8624532	343095	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	67
8624456	343108	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	64
8624490	343106	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	59
8624428	343061	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	79
8623868	343812	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	35
8623848	343833	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	47
8623770	343859	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	59
8623750	343907	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	52
8623488	345329	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	66
8623506	345155	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	37
8623506	345001	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	45
8623488	344913	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	34

Tabela 4.1 – Continuação

M	P	Litologia	Radiação
8623426	344655	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	49
8623646	344375	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	74
8624100	410234	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	43
8624316	343868	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	35
8624428	343813	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	49
8624654	343717	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	47
8624768	343740	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	48
8624888	343658	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	57
8624776	343654	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	50
8624570	343631	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	48
8624490	343574	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	65
8624456	343578	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	60
8624392	343516	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	66
8624360	343509	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	42
8624342	343491	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	64
8624366	343017	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	70
8624360	343036	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	67
8624348	343071	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	63
8623026	345801	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	41
8623064	345795	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	33
8623226	345262	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	63
8623208	345170	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	64
8623216	345147	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	58
8623206	345102	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	47
8623182	345058	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	64

Tabela 4.1 – Continuação

M	P	Litologia	Radiação
8623184	345029	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	73
8623168	344977	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	70
8623120	344804	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	79
8623074	344771	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	63
8623296	343465	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	64
8623336	343428	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	56
8623598	342144	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	71
8623650	342145	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	77
8623698	342085	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	54
8623758	342083	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	78
8623806	342019	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	72
8623860	342034	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	65
8623094	342051	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	51
8623210	342002	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	56
8623334	341878	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	72
8624380	342966	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	65

Tabela 4.1 – Continuação

M	P	Litologia	Radiação
8624346	342945	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	47
8623246	345948	Arenito médio c/ cimento calcário	37
8623244	345949	Arenito médio c/ cimento calcário	50
8623210	345966	Arenito médio c/ cimento calcário	41
8623134	346001	Conglomerados c/ cimento calcário	56
8623102	346033	Arenitos grosso c/ cimento calcário	50
8623082	346032	Arenitos grosso c/ cimento calcário	66
8623040	346046	Arenito médio a fino c/ cimento calcário	45
8623016	346037	Arenitos fino c/ cimento calcário	42
8622942	346067	Arenitos grosso c/ cimento calcário	56
8622892	346067	Arenitos grosso c/ cimento calcário	32
8622812	346114	Conglomerados c/ cimento calcário	49
8622510	346218	Arenitos fino c/ cimento calcário	49
8622984	346264	Conglomerados c/ cimento calcário e ferruginoso	27
8622430	346382	Arenitos médio c/ cimento ferroginoso e calcário	45
8622402	346436	Arenitos médios c/ cimento ferruginoso e calcário	64
8622372	346469	Arenitos médios c/ cimento ferruginoso e calcário	64
8622388	346506	Conglomerados c/ cimento carbonatado	49
8622372	346544	Arenitos fino c/ cimento carbonatado fraco	89
8622348	346639	Arenitos fino c/ cimento calcário	53
8622360	346758	Arenitos c/ cimento ferruginoso calcário	49
8622366	346832	Arenitos grosso c/ cimento calcário	37
8622396	346914	Arenito fino c/ cimento calcário	43
8623070	348076	Gesso	28

Tabela 4.1 – Continuação

M	P	Litologia	Radiação
8623102	348161	Gesso	36
8623112	348172	Arenitos grosso c/ cimento ferruginoso	62
8623428	348298	Arenitos calcários c/ cimento ferruginoso	38
8623530	348338	Arenito médio c/ cimento calcário	86
8623622	348369	Arenito médio c/ cimento calcário	39
8623658	348256	Arenitos fino c/ cimento fortemente calcário	34
8621510	362679	Gneisses – Granitos - migmatitos	96
8621542	362689	Gneisses - Granito	63
8621564	362660	Gneisses - Granito	94
8621604	362662	Gneisses - Granito	84
8621668	362619	Gneisses - Granito	108
8621678	362574	Gneisses - Granito	96
8621714	362588	Gneisses - Granito	87
8621790	362770	Gneisses - Granito	105
8621658	362821	Gneisses - Granito	50
8621524	362931	Gneisses - Granito	91
8621464	362856	Gneisses - Granito	107
8621272	362847	Gneisses - Granito	92
8622102	362930	Gneisses - Granito	99
8621348	362672	Gneisses - Granito	102
8621622	362439	Gneisses - Granito	91
8621658	362487	Gneisses - Granito	71
8621478	362474	Gneisses - Granito	109
8621414	362416	Gneisses - Granito	77
8621420	362395	Gneisses - Granito	76
8621404	362441	Gneisses - Granito	93
8621382	362417	Gneisses - Granito	109
8621274	362429	Gneisses - Granito	76
8621220	362387	Gneisses - Granito	85
8621162	362287	Gneisses - Granito	68
8621188	362275	Gneisses - Granito	90
8620968	362085	Gneisses - Granito	82
8620922	361885	Gneisses - Granito	108

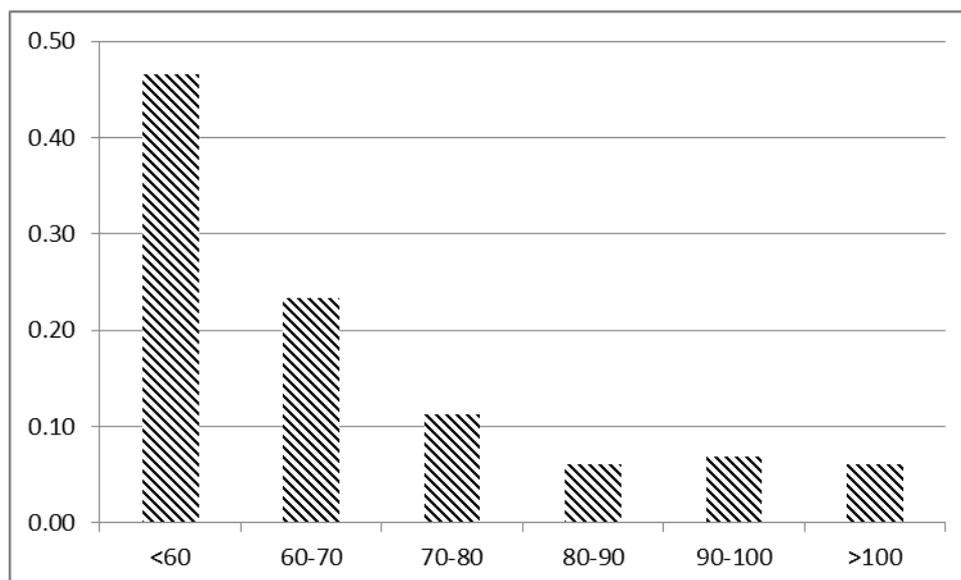


Figura 4.3 – Histograma da distribuição dos valores de radiação natural (em cpm) obtidos em rochas das 3 unidades estudadas.

Os valores dispersam-se entre 27 e 109 cpm sendo 63 cpm o valor mais frequente (tabela.4.2). A mediana é similar à média aritmética e o desvio padrão situa-se em 20.2 cpm, a que corresponde um coeficiente de variação de 32%.

Tabela.4.2- Valores de alguns parâmetros estatísticos referentes aos dados radiométricos obtidos no conjunto das unidades estudadas.

Média	63
Mediana	63
Mínimo	27
Máximo	109
Desvio padrão	20,2
Coeficiente de variação (%)	0,32

Analisando agora individualmente cada unidade geológica, projectam-se na (tabela.4.3) os resultados obtidos para o Complexo metamórfico e visualizam-se no histograma da distribuição da (figura.4.4) Os valores de alguns parâmetros estatísticos básicos projectam-se na (tabela.4.4).

Tabela.4.3 - Valores de radiação natural (em cpm) obtidos nas rochas integradas no designado Complexo metamórfico.

M	P	Litologia	Radiação
8621510	362679	Gneisses - Granito	96
8621542	362689	Gneisses - Granito	63
8621564	362660	Gneisses - Granito	94
8621604	362662	Gneisses - Granito	84
8621668	362619	Gneisses - Granito	108
8621678	362574	Gneisses - Granito	96
8621714	362588	Gneisses - Granito	87
8621790	362770	Gneisses - Granito	105
8621658	362821	Gneisses - Granito	50
8621524	362931	Gneisses - Granito	91
8621464	362856	Gneisses - Granito	107
8621272	362847	Gneisses - Granito	92
8622102	362930	Gneisses - Granito	99
8621348	362672	Gneisses - Granito	102
8621622	362439	Gneisses - Granito	91
8621658	362487	Gneisses - Granito	71
8621536	362495	Gneisses - Granito	60
8621478	362474	Gneisses - Granito	109
8621414	362416	Gneisses - Granito	77
8621420	362395	Gneisses - Granito	76
8621404	362441	Gneisses - Granito	93
8621382	362417	Gneisses - Granito	109
8621274	362429	Gneisses - Granito	76
8621220	362387	Gneisses - Granito	85
8621162	362287	Gneisses - Granito	68
8621188	362275	Gneisses - Granito	90
8620968	362085	Gneisses - Granito	82
8620922	361885	Gneisses - Granito	108

Neste complexo, composto essencialmente por rochas do tipo gneisses e migmatitos, os valores da radiação natural encontrados vão desde 50 a 109 cpm, conforme espelha a (tabela.4.3) Tendo em atenção o histograma de distribuição dos valores representados na (figura.4.5) observa-se que 50% dos valores encontrados

nesta unidade têm valores superiores a 90 cpm distribuindo-se os restantes pelas restantes classes; 25% ocorrem nas classes intermédias e 14% nas classes de valores mais baixos. A média geométrica é de 88,2 cpm, a mediana situa-se em 91,0 cpm e o desvio padrão é de 15,9 cpm (tabela ...).

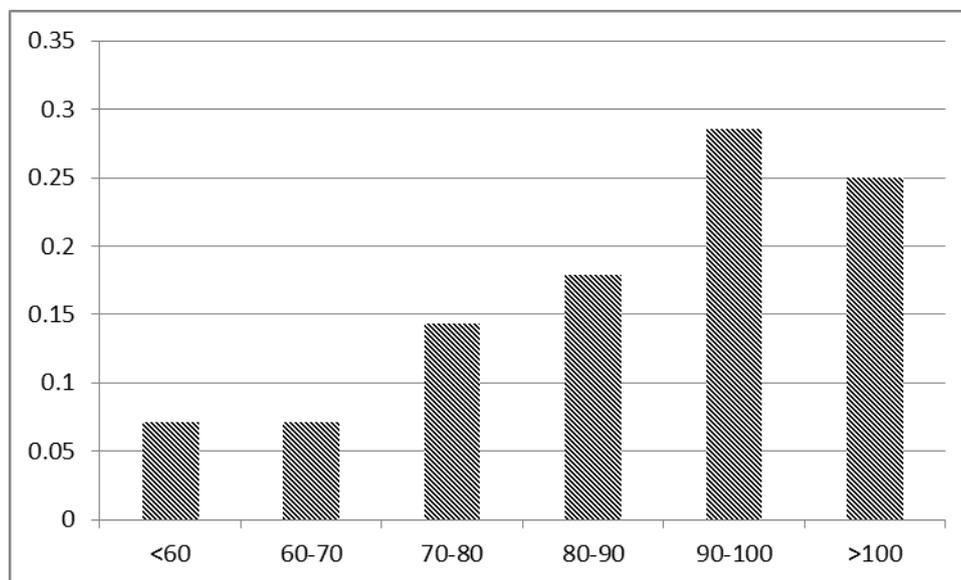


Figura.4.5. Histograma da distribuição dos valores de radiação natural (em cpm) obtidos em rochas do Complexo metamórfico.

Tabela.4.4 – Valores de alguns parâmetros estatísticos calculados com base nos dados radiométricos obtidos no Complexo Metamórfico.

Média	88,2
Mediana	91,0
Mínimo	50
Máximo	109
Desvio padrão	15,9
Coef. Variação	0,18

A variabilidade observada na emissão de radiação gama pelos materiais geológicos que constituem esta unidade geológica está de acordo com os dados geológicos que indicavam a presença de diferentes tipos litológicos, desde rochas ígneas de características mais ácidas, como gneisses, granitos e migmatitos, até rochas de natureza mais básica, como doleritos; encontram-se ainda xistos evidenciando sinais de anatexia parcial. Atendendo à discussão havida no capítulo 3, nomeadamente no que refere à distribuição das concentrações dos elementos radioactivos nos diversos tipos de rochas, os resultados obtidos no Complexo

metamórfico estão em acordo com esses dados uma vez que as rochas básicas são, dentro do grupo das rochas ígneas, as que apresentam valores mais baixos.

No que se refere às rochas sedimentares da Formação Catumbela, os valores obtidos expõe-se na (tabela.4.5) e no histograma da (Figura.4.5) na (tabela.4.6) figuram ainda os parâmetros estatísticos calculados para estes mesmos dados. Os valores radiométricos variam entre 27 a 89 cpm, verificando-se, no histograma de distribuição, que aproximadamente 80% dos valores são inferiores a 70 cpm. O valor médio estimado foi de 54,7 cpm e o coeficiente de variação é 28%, o que denuncia alguma variação certamente associada a alguma heterogeneidade lítica com a presença de rochas carbonatadas mas também detríticas. Comparativamente ao complexo metamórfico os valores obtidos nesta unidade estão mais centrados nas classes de valores mais baixos, o que era esperado dado ser do conhecimento geral (ver discussão no capítulo 2) que as rochas carbonatadas, que dominam nesta unidade, terem concentrações de elementos radioactivos muito baixas (o urânio, por exemplo, não ultrapassa os 2 ppm).

Tabela.4.5 - Valores de radiação natural (em cpm) obtidos nas rochas sedimentares integradas na Formação Catumbela.

M	P	Litologia	Radiação
8623026	345801	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	41
8623064	345795	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	33
8623226	345262	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	63
8623208	345170	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	64
8623216	345147	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	58
8623206	345102	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	47
8623182	345058	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	64
8623184	345029	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	73
8623168	344977	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	70

Tabela.4.5 - Valores de radiação natural (em cpm) obtidos nas rochas sedimentares integradas na Formação Catumbela.

M	P	Litologia	Radiação
8623120	344804	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	79
8623074	344771	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	63
8623296	343465	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	64
8623336	343428	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	56
8623598	342144	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	71
8623650	342145	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	77
8623698	342085	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	54
8623758	342083	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	78
8623806	342019	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	72
8623860	342034	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	65
8623094	342051	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	51
8623210	342002	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	56
8623334	341878	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	72
8624380	342966	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	65
8624346	342945	Calcários, calcários oolíticos, calcários pisolíticos, calcarenitos e dolomíticos	47
8623246	345948	Arenitos médio c/ cimento calcário	37
8623244	345949	Arenitomédio c/ cimento calcário	50

Tabela.4.5 – Continuação.

M	P	Litologia	Radiação
8623210	345966	Arenito médio c/ cimento calcário	41
8623134	346001	Conglomerados c/ cimento calcário	56
8623102	346033	Arenitos grosso c/ cimento calcário	50
8623082	346032	Arenitos grosso c/ cimento calcário	66
8623040	346046	Arenito médio a fino c/ cimento calcário	45
8623016	346037	Arenitos fino c/ cimento calcário	42
8622942	346067	Arenitos grosso c/ cimento calcário	56
8622892	346067	Arenitos grosso c/ cimento calcário	32
8622812	346114	Conglomerados c/ cimento calcário	49
8622510	346218	Arenitos fino c/ cimento calcário	49
8622984	346264	Conglomerados c/ cimento calcário e ferruginoso	27
8622430	346382	Arenitos médio c/ cimento ferruginoso e calcário	45
8622402	346436	Arenitos médio c/ cimento ferruginoso e calcário	64
8622372	346469	Arenitos nédio c/ cimento ferruginoso e calcário	64
8622388	346506	Conglomerados c/ cimento carbonatado	49
8622372	346544	Arenitos fino c/ cimento carbonatado fraco	89
8622348	346639	Arenitos fino c/ cimento calcário	53
8622360	346758	Arenitos c/ cimento ferruginosos calcários	49
8622366	346832	Arenitos grosseiro c/ cimento calcário	37
8622396	346914	Arenitos fino c/ cimento calcário	43
8623070	348076	Gesso	28
8623102	348161	Gesso	36
8623112	348172	Arenitos grosseiro c/ cimento ferruginoso	62
8623428	348298	Arenitos calcários/ cimento ferruginoso	38
8623530	348338	Arenitos médios c/ cimento calcário	86
8623622	348369	Arenitos médios c/ cimento calcário	39
8623658	348256	Arenitos finos c/ cimento fortemente calcário	34

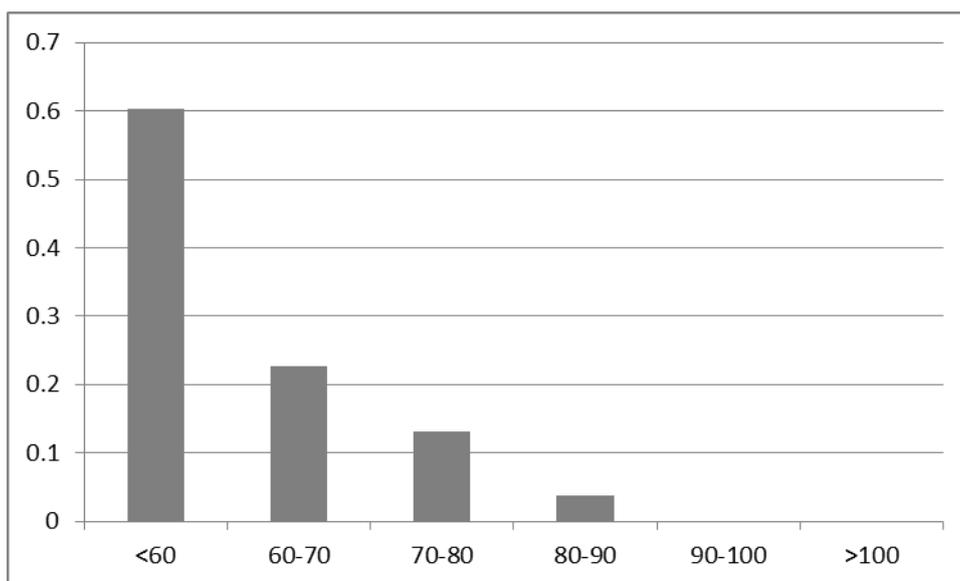


Figura.4.5 - Histograma da distribuição dos valores de radiação natural (em cpm) obtidos em rochas da Formação Catumbela.

Tabela.4.6 – Valores de alguns parâmetros estatísticos calculados com base nos dados radiométricos obtidos na Formação Catumbela.

Média	54,7
Mediana	54,0
Mínimo	27
Máximo	89
Desvio-padrão	15,0
Coef. Variação	0,28

Os valores radiométricos apurados em rochas sedimentares da Formação Quissonde projectam-se na (tabela.4.7) a distribuição é graficamente expressa no histograma da (figura.4.6) e os parâmetros estatísticos básicos apresentam-se na (tabela.4.8) Os valores distribuem-se entre 34 a 79 cpm, sendo o valor médio de 55,8 cpm, o desvio padrão de 12,1 cpm e o coeficiente de variação de 22%; mais de 90% dos valores estão abaixo de 70 cpm (Figura.4.6). Esta formação é, assim, muito semelhante do ponto de vista de emissão de radiação natural à Formação Catumbela, embora um pouco menos heterogénea, o que não se estranha dado que do ponto de vista litológico são também relativamente próximas; em ambos os casos dominam as rochas carbonatadas.

Tabela.4.7- Valores de radiação natural (em cpm) obtidos nas rochas integradas na designada Formação Quissonde. M e P em metros.

M	P	Litologia	Radiação
8624346	342945	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	47
8624380	342966	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	65
8624366	343017	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	70
8624360	343036	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	67
8624348	343071	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	63
8624532	343095	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	67
8624456	343108	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	64
8624490	343106	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	59
8624428	343061	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	79
8623868	343812	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	35
8623848	343833	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	47
8623770	343859	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	59
8623750	343907	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	52
8623488	345329	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	66
8623506	345155	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	37
8623506	345001	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	45
8623488	344913	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	34
8623426	344655	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	49
8623646	344375	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	74
8624100	410234	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	43
8624316	343868	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	35
8624428	343813	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	49
8624654	343717	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	47
8624768	343740	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	48
8624888	343658	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	57
8624776	343654	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	50
8624570	343631	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	48
8624490	343574	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	65
8624456	343578	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	60
8624392	343516	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	66
8624360	343509	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	42
8624342	343491	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	64

Tabela.4.7- Continuação

M	P	Litologia	Radiação
8624366	343017	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	70
8624360	343036	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	67
8624348	343071	Calcários, margas, calcários argilosos, argilas	63

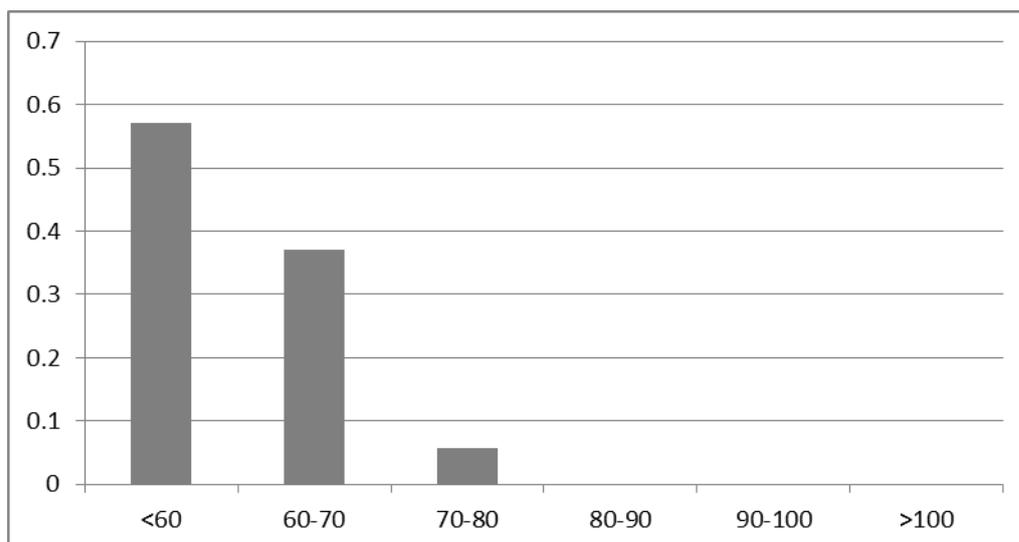


Figura.4.6- Histograma da distribuição dos valores de radiação natural (em cpm) obtidos em rochas sedimentares da Formação Quissonde.

Tabela.4.8 Valores de alguns parâmetros estatísticos calculados com base nos dados radiométricos obtidos na Formação Quissonde.

Média	55,8
Mediana	59,0
Mínimo	34
Máximo	79
Desvio padrão	12,1
Coeficiente de variação	0,22

António (2011) efectuou, com base no mesmo equipamento e metodologia, estudos similares em rochas aflorantes na região da Baía Farta-Cuio (Benguela). Neste trabalho foi medida a emissão de radiações de rochas sedimentares, detríticas e

carbonatadas. Estas últimas integram-se na Formação Quissonde, tal como as que foram estudadas no presente estudo.

Os valores médios obtidos nas proximidades da Baía Farta são similares aos observados no presente trabalho, realizado numa região situada mais a Norte (cerca de 55 cpm). Este valor é inferior aos que são citados por António (2011) para rochas detríticas, em particular as de natureza argilosa que, nalguns casos, ultrapassam os 100 cpm.

Para comparar os resultados obtidos em território angolano com os medidos em rochas similares aflorantes no território português, e porque neste último caso as medições têm sido efectuadas com outro equipamento (cintilómetro portátil, SPP2) utilizou-se a relação já estabelecida em António (2011) para converter os dados do contador Geiger-Muller em equivalentes SPP2, a seguir descrita:

$$\text{SPP2 (cps)} = \text{RM} * 1.12 \text{ (cpm)}$$

Na (tabela.4.9) apresentam-se os resultados após efectuada a conversão verificando-se que as rochas carbonatadas que ocorrem em Angola têm um fundo radiométrico médio um pouco mais elevado que o observado em rochas similares portuguesas (uma situação já referida também por António, 2011). As rochas ígneas e metamórficas situam-se próximo do limite inferior estabelecido para rochas portuguesas. Como aquelas rochas aparentam ser de natureza mais básica seria de esperar a situação observada.

Tabela.4.9 - Comparação entre os valores médios radiométricos (em cps) obtidos em litologias de afins em Angola e em Portugal.

LITOLOGIA	CATUMBELA (Angola)	PORTUGAL
Rochas carbonatadas (Formação Quissonde)	62,5	30 – 50
Rochas carbonatadas com ocorrência de níveis detríticos e evaporíticos (Formação Catumbela)	61,3	30 – 50
Rochas gneisso-granítico-migmatíticas e doleritos	98,8	70 – 250

5. CONCLUSÕES

Com base na diversa informação colhida no decorrer do presente trabalho procurou-se avaliar os níveis de radioactividade natural em diferentes sectores da região da Catumbela (Angola) num perfil efectuado paralelamente ao rio do mesmo nome.

Para o efeito determinaram-se as emissões alfa, beta e gama das diferentes litologias aflorantes na região que se integram em formações/unidades geológicas diversas.

Os resultados obtidos mostram que os valores mais elevados, como seria de esperar face às concentrações normais de elementos radioactivos neste tipo litológico, foram obtidos nas rochas ígneo-metamórficas que integram o designado Complexo Metamórfico de idade pré-câmbrica. As rochas sedimentares carbonatadas, dominantes nas Formações Catumbela e Quissonde, ambas de idade cretácica, têm valores significativamente mais baixos, similares aos observados em estudo análogo realizado na região da Baía Farta (sul de Benguela). Os dados obtidos em ambos os estudos e comparativamente aos conhecidos em Portugal para rochas similares, indicam que os valores medidos no território angolano são ligeiramente superiores no caso das rochas sedimentares e posicionam-se junto ao limiar inferior do intervalo definido em Portugal para rochas do tipo ígneo-metamórfico.

Os baixos fluxos de radiação medidos no presente estudo fazem pressupor que os riscos de exposição à radiação ionizante para as populações locais serão baixos.

Atendendo ao que atrás foi dito, podemos considerar que o trabalho realizado é um trabalho em aberto e que mais do que um ponto de chegada é um ponto de partida para o aprofundamento do conhecimento desta problemática na região. Dai que, em jeito de recomendação, o Governo angolano pense na possibilidade de criação de uma base de dados a nível nacional sobre aos níveis de radioactividade no território angolano.

Recomenda-se que os resultados do presente trabalho sejam arquivados para o nosso futuro quando a pois decidir criar uma base de dados dos níveis de radioactividade os mesmo sirvam como fonte de informação.

Que se incentive a comunidade Académica no sentido de prosseguir com os levantamentos de dados nos vários pontos do território nacional dos níveis de radioactividade principalmente nas zonas habitadas e mais frequentadas pelas populações.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antunes, M. (1964) – O Neocretácico e o Cenozóico do litoral de Angola. Junta Investigação do Ultramar, vol. 2, 122 p.
- Buta-Neto, A.; Tavateres, T. S.; Quesne, D.; Guiraud, M.; Meister, C.; David, B. & Morais, M.L. (2006) – Synthèse préliminaire des travaux menés sur le bassin de Benguela (Sud Angola): implications sédimentologiques, paléontologiques et structurales. *Africa Geoscience Review*, 13 (3): 239-250.
- Cardoso, E.M Apostila Educativa “ Radioactividade” (2000) - Comissão nacional de energia nuclear. Rio de Janeiro, Brasil, 19p.
- Carvalho, G. S. (1961) – Alguns problemas dos terraços quaternários de litoral de Angola. *Bol. Ser. Geol. Minas de Angola*, vol. 2, pp. 5-15.
- Carvalho, G. S. (1963) – Problemas de sedimentologia das praias do litoral de Angola (Entre a foz do rio Coporolo e o Lobito). *Garcia de Orta. Serv. Geol. Minas de Angola*, vol. x, pp. 12-18.
- Carvalho, G.S (1961) - Alguns problemas dos terraços quaternários do litoral de Angola. *Boletim dos Serviços de Geologia e Minas de Angola*. 2:5-16.
- Cruz, J.R. (1940). *Clima de Angola; elementos de climatologia*, Sem editor, Lisboa, 96p.
- Dimenstein, R. & Hornos, Y.M.M (2001) - Manual de protecção radiológica aplicada ao Radiológico- 3ª edição, p.59,60.
- Diniz, A., C., 2006- *Características Mesológicas de Angola*- Descrição e correlação dos Aspectos Fisiográficos dos Solos e da Vegetação das Zonas Agrícolas
- Diniz, A.C. (1998). *Angola, o Meio Físico e Potencialidades Agrárias*. 2ª Edição revista. Instituto da Cooperativa Portuguesa (ICP), 189p.
- Ervedosa, C. (1980) - *Arquiologia Angolana*. Ministério da Educação, Luanda, República popular de Angola, 424 p.
- Feio, M. (1946). *O relevo de Angola, segundo Jessen*, *Boletim da Sociedade de Portugal*, vol. 5: 267- 295.
- Ferreira, C. Nordemann, L.M.M.; Nordemann, D, JR. (1992) - A radioactividade natural na região de Irecê. *Revista Brasileira de Geociências*, 22 (2): 168- 174.
- Figueiredo, J.M.S (1998) - *O radão nas matérias geológicas da área urbana de Castelo Branco*. Tese de Mestrado, Faculdade Neves, L., J., P., F., & Pereira,
- Filho, P.F.L.H. (2004) - *Segurança nuclear e Protecção do meio ambiente*. E. papers serviços Editoriais Ltda. Rio de Janeiro- Brasil. 316p.
- Florenzo, T. G.(2008). *Geomorfologia. Conceitos e Tecnologia Actuais*. Oficina de Textos.

- Galvão, C.F e Silva, Z. (1972). Notícia explicativa da folha Nº 227- 228 Lobito da carta geológica de Angola na Escala: 1: 100.000. Direcção Provincial dos Serviços de Geologia e Minas.
- Gonçalves, C., Pereira, A.J.S.C., L.C.G., Neves, L.J.P.F. (2007)- Radão em águas subterrâneas da região da Serra do Bucaço (Portugal). Radioprotecção, II, (10-11), 48-60.
- Gonçalves, C.V.M. (2006) – Avaliação dos níveis de radioactividade natural na região do Bucaço e factores geológicos condicionantes. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 99p.
- Gregory, J.W. (1916)- Contributions to the geology of Benguela. Trans. Roy. Soc. Edinburgh. 51, 496-536.
- Guiraud, M; Buta-Neto,A. & Quesne, D. (2010) - Segmentation and differential post-rifted Benguela and oblique –to-orthogonal- rifted kwanza basins. Marine and petroleum Geology. 27: 1040- 1068.
- I.A.E.A. (1992). Measurement and calculation of radon releases from uranium mill Tailings. Technical reports. 333. Vienna.
- Inácio, A.B. (2011). Avaliação dos níveis de radioactividade natural na região da Baía-Farta (Cuio). Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra.
- Mariano Feio (1960) – As praias levantadas da região do Lobito e Baía Farta. Garcia de Orta, vol. 8 (2), pp. 357-370.
- Marques M.M. (1966). Les grandes unités geomorphologiques d`Angola. Boletim Serv. Geol. Minas Angola, 13: 13-16.
- Neves, L F. & Pereira, A.J.S.C. (2004) - Radioactividade natural e ordenamento do território: o contributo das Ciências da Terra. Geonovas, Associação Portuguesa de Geólogos, 104-113.
- Neves, L.J.P.F.; Pereira, A.J.S.C.; Godinho, M.M. & Dias, J.M. (1996)- A radioactividade das rochas como factor de risco ambiental no território português. In: C. Conelho, C. Borrego, L. Arroja, C. Boia & L. Figueiredo (Eds.) – Livro de resumos da V. Conferência Nacional sobre a Qualidade do Ambiente, Aveiro, 641-650.
- Pereira, A.J.S.C. e Neves, L.J.P.F.(2010)- Geogenic controls of indoor radon in Western Iberia. Actas, 10 th International Workshop on the Geologia Aspects of Radon Risk Mappng, Prague, 10 p.
- Pereira, A.J.S.C.; Neves L.J.P.F.; Soares, A.F.; Godinho,M.M. & Marques. J.F. (1997) – Distribuição de U e Th em rochas da região de Coimbra (Portugal Central). In: IV Congresso dos Países de Lingua Portuguesa, Braga, p. 405- 410.

- Pereira, J.C. (1970). Gravuras Portuguesas. 10ª Série (Angola), Prefacio de Carlos Vieira da Rocha. 74p.. Disponível em <http://memoria-africa.ua.pt>, consultado em 28-06-2011.
- Pereira, P.J.S.C.; Neves, L.J.P.F.; Godinho, M.M. & Dias, J.M. (1996). A radioactividade das rochas como factor de risco ambiental no território português. In: C. Coelho, C. Borrego, L. Arroja, C. Boia & L. Figueiredo (Eds.)- Livro de resumos da V Conferência Nacional sobre a Qualidade do Ambiente, Aveiro, pp. 641-650.
- Pinto, P.G.A.N., Pereira, A.J.S.C., Neves, L.J.P.F (2011) – O Gás Radão no Contexto da Legislação sobre a Qualidade do ar Interior em Edifícios – a Experiências Portuguesa. Actas, III Congresso de Protecção Contra Radiações dos Países e Comunidades de Língua Portuguesa, Recife, Brasil
- Sanches, M.P. (2004) - *Identificação e análise dos Principais Radionúcleos que Potencialmente Contribuíram para a Dose Interna dos Trabalhadores do Centro de Radiofarmácia*, São Paulo, Brasil.
- Serviços Meteorológicos de Angola (1974). Conferência de estudos hidrológicos, Serviços de Meteorologia de Angola.
- Stark, D.M. e Grupo Schlumberger (1991). Avaliação de Formações de Angola. Sem editora.
- <http://www.cnem.gov.br/ensino/apostils/radio.pdf>
- <http://www.cnem.gov.br>
- <http://www.coladaweb.com/química/química-nuclear>.
- www.nuclear.radiologia.nom.br.
- <http://www.ifi.unicamp.br/htc/biografia>.