

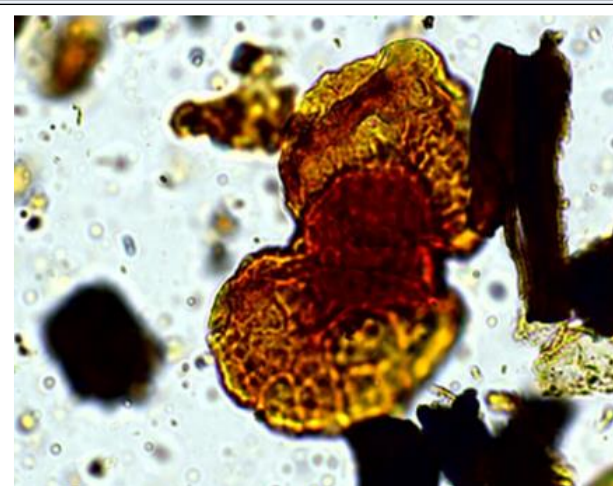
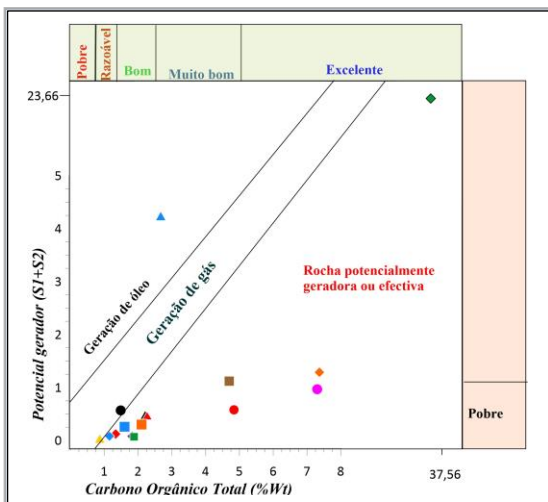


UNIVERSIDADE  
E D U A R D O  
MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA  
Licenciatura em Geologia Aplicada

### PROJECTO CIENTÍFICO

**Datação Relativa e Potencial Gerador de Hidrocarbonetos em Afloramentos Pérmicos do Graben de Metangula.**



**Autor: Jardel Júlio Peu**

Maputo, Abril 2024



UNIVERSIDADE  
E D U A R D O  
MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Licenciatura em Geologia Aplicada

PROJECTO CIENTÍFICO

**Datação Relativa e Potencial Gerador de Hidrocarbonetos em Afloramentos Pérmicos do Graben de Metangula.**

**Autor:** Jardel Júlio Peu

**Supervisores:**

Mestre Belarmino Massingue (Universidade Eduardo Mondlane)

Mestre Nelson Nhamutole (Museu Nacional de Geologia,  
Universidade de Witwatersrand,  
Johannesburg)

Maputo, Abril 2024

**DEDICATÓRIA**

*Aos meus pais Júlio Dibobuane Peu e Alexa Filipe Chambule, e á  
minha tia Isabel Fernando (in memoriam).*

## AGRADECIMENTOS

Primeiro agradecer á Deus por intermédio de Jesus, e Jesus por intermédio do pai consolador pelo dom da vida e da sabedoria.

Um forte agradecimento aos meus pais por todos ensinamentos proporcionados desde a minha infância que serviram de base para o meu desenvolvimento sociocultural e académico.

Aos meus familiares em especial os irmãos Beldino Peu, Amilcar Agy, Márcia Pedro, Lordino Peu e Danilo Peu pelo apoio directo durante o meu percurso académico. A todos meus irmãos agradeço profundamente pelo apoio e amor que sempre foi demonstrado. Aos meus amigos e primos Pedro Chambule, Isaias Nhancale e Assencio Bombi.

Ao meu supervisor **Nelson Nhamutole**, pela confiança e oportunidade de me integrar na equipe da Palinologia e Geoquímica orgânica. Pela paciência e os conhecimentos transmitidos durante a realização do trabalho. Ao meu supervisor **Belarmino Massingue**, por ter aceitado o desafio de desenvolver este projecto científico e pelas orientações dadas durante a realização deste trabalho.

Um agradecimento especial e profundo á **Universidade Eduardo Modlane (UEM)** e a **Hidroelétrica de Cahora Bassa** pelas bolsas de estudo que me foram atribuídas durante o meu percurso académico, estas que serviram de suporte financeiro e acima de tudo a minha fonte de inspiração para continuar focado e determinado em prol dos meus objectivos.

Aos meus colegas de formação em especial os da turma de 2018 que sempre estiveram próximos como é o caso da Aldevina dos Anjos, Lázaro Mavaieie, Milton Milambo, Manuel Carmona, Arlete Conde , Rita Macamo, Ebiuth Jurema e Vanusa Macuácu. A toda equipe do Museu Nacional de Geologia em especial a equipe da geoquímica orgânica como é o caso da Milene Nobre, Aldevina dos Anjos, Shelcea Foquiço e Lectícia Boi, ao meu amigo Cardoso Bande que apesar de não fazer parte da equipe esteve sempre presente durante a realização deste trabalho .

**Meu Muito Obrigado**

## **DECLARAÇÃO DE HONRA**

Eu, **Jardel Júlio Peu**, declaro por minha honra que os resultados obtidos e apresentados no presente Projecto Científico são da minha autoria, com orientação dos meus supervisores e que nunca tinha sido apresentado ou submetido a uma outra instituição académica nacional ou estrangeira, e constitui fruto de minha investigação, sendo que todas as bibliografias consultadas estão devidamente citadas e referenciadas.

O Autor

---

**(Jardel Júlio Peu)**

## RESUMO

O presente estudo faz o uso de dados provenientes de técnicas rotineiras na indústria de hidrocarbonetos como a Pirólise Rock-eval para determinar a quantidade, qualidade da matéria orgânica e o potencial gerador de hidrocarbonetos, bem como a técnica de microscopia de luz branca transmitida para a datação dos afloramentos ao longo dos quais o estudo foi feito. As amostras analisadas provêm dos afloramentos de Michunwa (formação K6 – Pérmico médio), Luíga (formação KSb- Pérmico superior) Luchai e Nhamago (formação K4-Pérmico inferior), localizados no graben de Metangula província de Niassa.

Em termos quantitativos, os valores COT (carbono orgânico total) mostraram-se moderados a altos o que indica um potencial de geração bom a excelente para todos os afloramentos analisados. Em termos qualitativos, verifica-se ocorrência do querogênio tipo III (percursor de gás) e uma mistura de querogênio tipo II/III (percursor de petróleo ou gás). Por outro lado os valores de Tmax e %Ro demonstram uma supermaturação da MO o que pode estar associado aos eventos tectónicos que acompanharam o processo de subsidência desta bacia. Em termos de geração, na formação K6 e KSb verifica-se um potencial para geração de gás e óleo respectivamente, ao longo dos níveis compostos por siltitos e argilitos, e para a formação K4 o potencial para geração de gás é verificado nos argilitos cinzentos.

Em termos palinostratigráficos a assembleia de pólenes recuperada do afloramento de Luchai mostra uma transição entre a biozona KK2 e KK3 de Modie 2007 marcada pelo primeiro aparecimento das espécies *Platysaccus papilionis*, *Striatopodocarpites fusus* acompanhados de *Lueckisporites virkkiae*, *Striatopodocarpites gondwanensis*, que indicam uma idade de Roadiano para este afloramento. Este facto traz novos elementos se equiparado aos estudos feitos pelo Verniers et al., 1989 trazendo novas espécies e sugerindo novas informações concernentes aos limites de idade geológica da Formação K4. Contudo, para o afloramento de Luíga, foi recuperada uma associação de pólenes e esporos estratigraficamente importantes marcada pelo aparecimento da espécie *Guttulapollenites hannonicus* acompanhado de *Weylandites lucifer* e *Polypodiisporites mutabilis* que indicam a idade de Changhsingiano (Lopingiano superior) para este afloramento. Por outro lado, para o afloramento de Michunwa não foi possível recuperar uma associação estratigraficamente importante, devido a ausência de espécies guias, pois foram recuperadas espécies de uma elevada amplitude estratigráfica.

## ÍNDICE

|  |                              |
|--|------------------------------|
| DEDICATÓRIA .....  | i                            |
| AGRADECIMENTOS .....   | ii                           |
| DECLARAÇÃO DOS SUPERVISORES .....                                | Erro! Marcador não definido. |
| DECLARAÇÃO DE HONRA.....   | iii                          |
| RESUMO.....  | iv                           |
| LISTA FIGURAS .....  | vii                          |
| LISTA DE TABELAS.....  | viii                         |
| LISTA ABREVIATURAS .....   | ix                           |
| <b>1. GENERALIDADES .....</b>                                    | <b>1</b>                     |
| 1.1. Introdução .....  | 1                            |
| 1.2. Apresentação do problema e relevância .....                 | 2                            |
| 1.3. Objectivos .....  | 3                            |
| 1.3.1. Objectivo Geral.....                                      | 3                            |
| 1.3.2. Objectivos específicos. ....                              | 3                            |
| 1.4. Localização da Área de estudo .....                         | 4                            |
| 1.5. Clima.....  | 5                            |
| <b>2. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO.....</b>                           | <b>6</b>                     |
| 2.1. Geotectónica .....  | 6                            |
| 2.2. Geologia Local .....  | 6                            |
| 2.2.1. Karoo Inferior .....                                      | 6                            |
| 2.2.2. Karoo médio.....  | 7                            |
| 2.2.3. Karoo Superior .....                                      | 8                            |
| 2.2.4. Pós Karoo ou Karoo Indeterminado .....                    | 9                            |
| <b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                             | <b>11</b>                    |
| 3.1. Sistema petrolífero .....                                   | 11                           |
| 3.2. Rocha geradora e Matéria orgânica.....                      | 12                           |
| 3.2.1. Preservação da Matéria orgânica.....                      | 12                           |
| 3.3. Querogênio. ....  | 13                           |
| 3.4. Maturação térmica da MO e formação de Hidrocarbonetos ..... | 14                           |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.4.1. Refletância da Vitrinite.....   | 16        |
| 3.5. Análises Geoquímicas .....  | 18        |
| 3.5.1. Carbono Orgânico Total (COT) .....  | 18        |
| 3.5.2. Pirólise Rock-Eval.....   | 19        |
| 3.6. Palinostratigrafia .....  | 20        |
| 3.6.1. Palinomorfos.....   | 20        |
| 3.6.1.1 Pólenes.....   | 20        |
| 3.6.2. Esporos .....   | 23        |
| <b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>   | <b>26</b> |
| 4.1. Pesquisa Bibliográfica.....   | 26        |
| 4.2. Amostragem .....  | 27        |
| 4.3. Trabalho laboratorial .....   | 31        |
| 4.3.1. Preparação para análise palinostratigráfica. ....   | 31        |
| 4.3.2. Preparação para análise de Geoquímica Orgânica (Pirólise Rock-Eval e Carbono Orgânico Total)..... | 32        |
| 4.4. Processamento dos dados .....   | 33        |
| <b>5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>  | <b>34</b> |
| 5.1. Geoquímica orgânica.....  | 34        |
| 5.1.1. Carbono orgânico total .....  | 34        |
| 5.1.2. Pirólise Rock-eval.....   | 35        |
| 5.1.3. Refletância da Vitrinite.....   | 36        |
| 5.3. Tipos de querogênio e qualidade da matéria orgânica .....   | 39        |
| 5.4. Análise de maturação térmica das rochas fonte .....   | 40        |
| 5.6. Datação Palinológica.....   | 43        |
| <b>6. CONCLUSÕES.....</b>  | <b>49</b> |
| 6.1. Conclusões .....  | 49        |
| 6.2. Recomendações .....   | 50        |
| <b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>   | <b>51</b> |



## LISTA FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Mapa ilustrando a localização geográfica dos afloramentos em estudo. ....  | 4  |
| Figura 2: Mapa ilustrativo da geologia da área do estudo e os respectivos pontos de amostragem (adaptado de Verniers et al., 1989 ) .....  | 10 |
| Figura 3: Elementos e processos do sistema petrolífero.(adaptado de Jon & Richard,2004).....   | 11 |
| Figura 4: Em sedimentos finos de argila ou carbonato, a água dos poros se torna um microambiente quase fechado e as condições anóxicas são rapidamente estabelecidas protegendo a MO (a). (b) Ocorrência de livre circulação de água contendo O <sub>2</sub> destruindo a MO (adaptado de Tissot & Welte, 1984).....   | 12 |
| Figura 5 Composição da matéria orgânica disseminada em rochas sedimentares adaptado de (Tissot & welt,1985) .....  | 13 |
| Figura 6: Evolução térmica da MO com a profundidade com conseqüente formação de óleo ou gás AA-aminoácidos , AH-ácidos húmicos, CH-Carboidratos, AF-ácidos flúvicos , L- lípidos ( adaptado de Tissot & Welt citado por (BALBINOT, 2012)) .....  | 16 |
| Figura 7: (A) pólen não sacado (assacado), (B) pólen monossacado,(Correia, 2016).....  | 21 |
| Figura 8: (A e B) pólen bissacado diploxilonóde (C) pólen bissacado haploxilonóide, adaptado de (Ybert et al., 2012) .....   | 22 |
| Figura 9: ilustração de ténias e estrias em grãos de pólen bissacados, adaptado de (Ybert et al., 2012). .....   | 22 |
| Figura 10: ilustração de diferentes aberturas e dobras nos grãos de pólen.(A e B) diâmetro e os eixos de simetria dos grãos de pólen, (C) Pólen sem nenhuma abertura (inaperturado), (D) abertura em forma duma linha recta (monolete), (G e H) abertura em forma de V (dilete), (K e L) abertura em forma de Y (trilete), (E & F) existência de dobras sobre o corpo central, (I e J) dobras na junção dos sacos e do corpo (Ybert et al., 2012)..... | 23 |
| Figura 11: representação dos diferentes esporos de acordo com a marca germinativa, (A) esporo alete,(B) esporo monolete, (C) esporo trilete (Ybert et al., 2012). .....  | 24 |
| Figura 12: Ilustração dos contornos e lados dos esporos. (A) contorno circular, (B) subcircular, (C) subtriangular, (D) triangular, (E) elíptico, (F a I) lados rectos, côncavos , convexos e ondulados respectivamente (Ybert et al., 2012).....  | 25 |
| Figura 13: Algumas estruturas de ornamentação segundo (Ybert et al., 2012).....  | 25 |
| Figura 14 Fluxograma de actividades seguidas para elaboração do presente projecto científico. 26   |    |
| Figura 15: Logs sedimentar de amostragem dos afloramentos e as respectivas profundidades e litologias nas quais cada amostra foi retirada. (A)- Luchai, B- Luíga. ....   | 29 |
| Figura 16: Logs sedimentar de amostragem dos afloramentos e as respectivas profundidades e litologias nas quais cada amostra foi retirada. (C)- Michunwa, D- Nhamago.....  | 30 |
| Figura 17: fluxograma de actividades laboratoriais para análise palinostratigráfica baseado em Tysson 1995 citado em Spigolon 2003.....  | 31 |
| Figura 18 (A) lâminas organopalinológicas prontas para análise microscópica (B) fase de obtenção de microfotografias e (C)Contagem de palinomorfos existentes em cada lâmina. ....   | 32 |

Figura 19: Fases de preparação laboratorial para análises geoquímicas realizadas pelo supervisor Nelson Nhamutole.(A e B) etapa da trituração das amostras, (B) peneiros usados para seleção de partículas com granulometria ótima (60 mesh), (D) amostras prontas para serem submetidas às análises, (E) aquisição dos resultados das análises geoquímicas, (F) Pirograma resultante da análise de pirólise Rock-eval. .... 33

Figura 20 : gráfico de concentrações médias de COT em afloramentos. .... 34

Figura 21: Plotes de rochas fonte ilustrando as características geoquímicas dos afloramentos: A S2 vs COT ilustrando tipos e qualidades das rochas fonte (adaptado de Egbobawaye, 2017) B Potencial gerador (GP) vs COT ilustrando os tipos e qualidades de hidrocarbonetos esperados (adaptado Khan et al., 2022). C potencialidades de geração das rochas fonte usando HI vs COT (adaptado de Khan et al., 2022 ;(Alaug et al., 1866)). ..... 38

Figura 22: Diagrama de van Krevelen (A) e diagrama pseudo Van Krevelen (B) ilustrando os tipos de querogênio e os hidrocarbonetos a serem gerados. .... 40

Figura 23: Plote de HI vs Tmax ilustrando os tipos e a maturação térmica do querogênio(A). Plote de Tmax vs Ro ilustrando os estágios de maturação térmica da MO e o tipo de hidrocarboneto a ser gerado (B). ..... 41

Figura 24: Análise Paleo-ambiental das formações estudadas. .... 42

Figura 25: Distribuição dos palinomorfos por afloramento e profundidade..... 44

Figura 26: Distribuição cronológica dos afloramentos de acordo com o conteúdo palinológico.47

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Sequência estratigráfica do Karoo médio. .... 7

Tabela 2: Sequência estratigráfica do Karoo Superior. .... 8

Tabela 3: Formações do Pós Karoo. .... 9

Tabela 4 Correlação de parâmetros de maturação térmica e o estágio de maturação (adaptado de (Egbobawaye, 2017). .... 17

Tabela 5 Critérios de caracterização de rocha geradora usando %COT( adaptado de Egbobawaye, 2017) ..... 18

**LISTA DE APÊNDICES**

- Apêndice 1:** Tabela dos resultados da geoquímica orgânica e valores calculados de Refletância da Vitrinite;
- Apêndice 2:** Logs geoquímico e delimitação de horizontes geradores do afloramento de Nhamago .
- Apêndice 3:** Logs geoquímico e delimitação de horizontes geradores do afloramento de Luíga .

**Apêndice 4:** Logs geoquímico e delimitação de horizontes geradores do afloramento de Luchai.

**Apêndice 5:** Logs geoquímico e delimitação de horizontes geradores do afloramento de Michunwa.

**Apêndice 6:** Tabela de características morfológicas dos pólenes e esporos identificados .

### LISTA ABREVIATURAS

|                 |  |
|-----------------|--|
| C               | Carbono  |
| COT             | Carbono Orgânico Total                           |
| CO <sub>2</sub> | Dióxido de Carbono                               |
| °C              | Graus Celcius                                    |
| mgHc/grock      | Miligramas de hidrocarboneto por grama de rocha  |
| HCl             | Ácido Clorídrico                                 |
| HF              | Ácido fluorídrico                                |
| MO              | Matéria orgânica                                 |
| H               | Hidrogénio                                       |
| N               | Nitrogénio                                       |
| S               | Enxofre  |
| O               | Oxigénio   |
| Tmax            | Temperatura de máxima geração de hidrocarbonetos |
| %Ro             | Refletância da vitrinite                         |
| Mesh            | Peneiro.   |
| INP             | Instituto Nacional de Petróleo                   |
| NE              | Nordeste   |
| SW              | Sudoeste   |

## **1. GENERALIDADES**

### **1.1. Introdução**

Os combustíveis fósseis constituem actualmente a fonte primária de energia e têm contribuído para o desenvolvimento da economia global. O estudo das fácies orgânicas (como por exemplo a tipificação do querogênio, maturação térmica, quantificação da MO) e enquadramento palinoestratigráfico numa rocha fonte são alguns parâmetros que controlam o potencial de geração de hidrocarbonetos (Olivier & Atud, 2017). Em Al-Mashramah (2011), o Selly (1985) agrupa estes parâmetros em duas categorias: Paleotermómetros químicos e Paleotermómetros Biológicos. Os paleotermómetros químicos se ocupam pela investigação da geoquímica da matéria orgânica, e os biológicos consistem em análise da variação de índice de coloração de grãos de pólen e esporos fossilizados (Al-Mashramah 2011). A análise de grãos de pólen e esporos fossilizados bem como da MO dispersa ao seu todo fornece informações sobre o grau de maturação, a origem da matéria orgânica e o potencial de geração de hidrocarbonetos (Mendonça Filho et al., 2012). O presente trabalho de pesquisa, consiste na integração destes parâmetros de modo a avaliar o potencial de geração de hidrocarbonetos em sedimentos da bacia de Maniamba localizada a noroeste de Moçambique.

A Bacia de Maniamba é adjacente a bacia do Lago Niassa e está localizada a noroeste da província de Niassa com uma orientação sudoeste-nordeste, e apresenta uma estrutura de um graben completo delimitado por falhas que separam os terrenos precâmbrios dos sedimentos do Karoo. Nesta bacia, as formações sedimentares distribuem-se desde o Pérmico Inferior ao Jurássico Inferior, e na sua parte sul verifica-se a ocorrência de camadas de carvão (AFONSO, 1976). Na área de Metangula, Verniers et al (1989), reporta horizontes de argilitos siltosos avermelhados com vários níveis de ossadas de répteis. Em termo de dimensões, esta bacia possui cerca de 50 a 60km de largura e 150-140 Km de comprimento até a fronteira com a Tanzânia, e a área total da bacia no território Moçambicano é de 8000-8500 km<sup>2</sup>. Até os dias de hoje, não foram feitos estudos com vista a avaliar a potencialidade de ocorrência de hidrocarbonetos, porém dados relacionados as ocorrências de carvão mineral são utilizadas para suportar a potencialidade da bacia para a possível ocorrência de hidrocarbonetos (INP, 2014).

## **1.2. Apresentação do problema e relevância**

Moçambique possui um grande potencial em termos de recursos energéticos como gás natural e petróleo (Lächelt, 2004), sendo a Província de Niassa umas das mais destacáveis devido a ocorrência de depósitos de carvão, concretamente no distrito de Lago, na bacia de Metangula. Apesar do facto supracitado, esta bacia é menos estudada em termos de palinologia e geoquímica orgânica. Até dias de hoje não foram feitos estudos com vista a avaliar a potencialidade de ocorrência de hidrocarbonetos, e são utilizados dados relacionados as ocorrências de carvão mineral, para suportar a potencialidade de possível ocorrência de hidrocarbonetos nesta bacia (INP,2014). Portanto, não se tem uma informação fidedigna sobre a sua potencialidade em termos de geração. Adicionalmente, dos poucos trabalhos feitos nesta bacia referentes a palinologia destaca-se o trabalho de Verniers et al. (1989), este que apresenta uma limitação em termos dados palinológicos que não permitem estudo palinostratigráfico de detalhe(Pereira et al., 2014), devido ao número bastante reduzido de espécies de pólenes e esporos recuperadas neste estudo.

Assim sendo, este é o primeiro trabalho que versa sobre potencial gerador ao longo da bacia de Metangula, fazendo uma integração de datação relativa das camadas amostradas e geoquímica orgânica, servindo assim como um dado importante a ter se em conta para futuros trabalhos de pesquisa de hidrocarbonetos na Bacia Carbonífera de Maniamba.

### **1.2.1. Relevância**

O estudo das idades e do potencial de geração de hidrocarbonetos é de extrema importância uma vez que este estudo ajudará a compreender a historia geológica da formação da bacia, bem como dar continuidade aos estudos aos estudos realizados pelo Verniers et al. (1989), relacionados a datação dos sedimentos desta bacia. Por outro lado a investigação do potencial gerador de hidrocarbonetos pelos sedimentos servirá de mais um elemento importante a se ter em para os trabalhos futuros de pesquisa de hidrocarbonetos na bacia em estudo.

### **1.3. Objectivos**

#### **1.3.1. Objectivo Geral**

- ✓ Avaliar o potencial gerador de Hidrocarbonetos em sedimentos Pérmicos do Graben de Metangula.

#### **1.3.2. Objectivos específicos.**

- ✓ Elaborar log sedimentar-estratigráfico dos afloramentos;
- ✓ Identificar o tipo de Querogênio e hidrocarboneto potencialmente gerado pelas rochas geradoras;
- ✓ Determinar o grau de maturação térmica dos sedimentos;
- ✓ Determinar o paleoambiente deposicional dos sedimentos;
- ✓ Apresentar os logs geoquímicos para os afloramentos analisados;
- ✓ Realizar uma datação palinológica dos sedimentos em estudo;
- ✓ Construir um arcabouço palinoestratigráfico para cada afloramento;
- ✓ Relacionar os dados de geoquímica orgânica e de datação relativa.

#### 1.4. Localização da Área de estudo

A área de estudo localiza-se na região Norte de Moçambique, concretamente na província de Niassa, zona centro do distrito de Lago, entre latitudes 11° 30' e 13° 25' Sul e longitudes 34° 30' e 36° 00' Este (Figura 1) o qual é delimitado pela República Unida da Tanzânia a Norte, distrito de Lichinga a Sul, distrito de Sanga e Lago Niassa, a Este e Oeste, respectivamente (Ministério da Administração estatal, 2005).

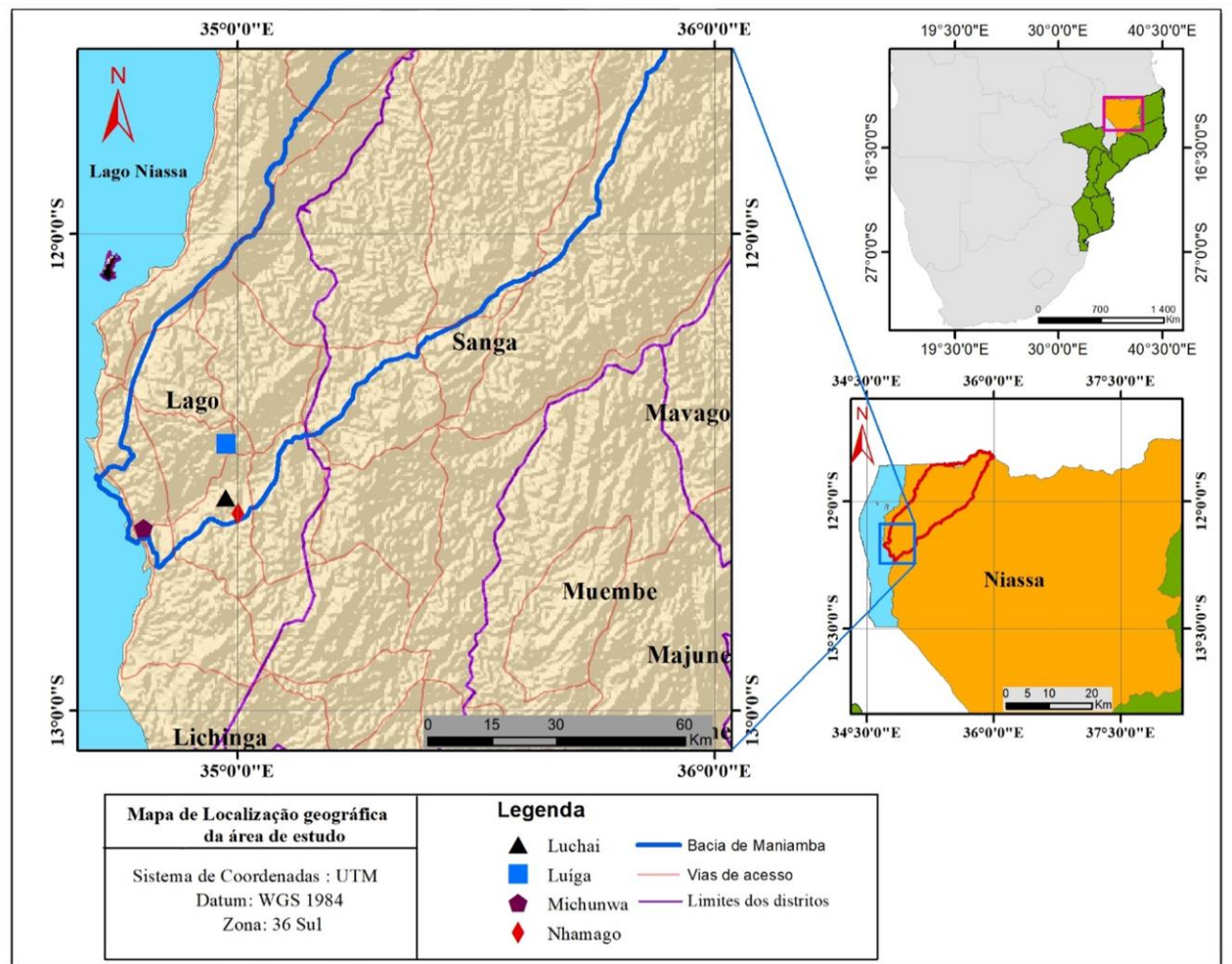


Figura 1: Mapa ilustrando a localização geográfica dos afloramentos em estudo.

### **1.5. Clima**

O clima do Distrito de Lago é tropical húmido com duas estações distintas: verões chuvosos e húmidos, e invernos secos. A temperatura média anual varia entre 22° à 24°C; a precipitação média anual varia entre 1.000 à 1.400 mm, sendo a época chuvosa confinada entre Novembro e Abril. As precipitações são em regime torrencial, acompanhadas de fortes tempestades (Ministério da Administração estatal, 2005).



## **2. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO**

### **2.1. Geotectónica**

Segundo Catuneanu (2005) em (Paulino et al., 2009), o graben de Metangula preserva o registo de um tempo especial na história da Terra, quando as massas continentais se concentravam num único continente gigante, Pangea, entre o Paleozóico Superior e o Mesozóico Inferior. Esta bacia desenvolveu-se durante a fragmentação do Pangeia. A bacia apresenta-se como uma estrutura de um graben delimitado por falhas que separam os terrenos precâmbrios dos sedimentos do Karoo (Paulino et al., 2009). Para além de falhas limítrofes, existem no interior da bacia falhas paralelas ao eixo principal do graben e outras normais ao referido eixo. Trata-se de falhas normais e subverticais, o que sugere que a formação desta bacia se deveu a um regime de forças distensivas (Afonso, 1986 in Paulino et al., 2009). A concordância do alongamento da bacia na direcção NE-SW com a direcção dos alinhamentos, na mesma direcção do Cinturão de Moçambique, leva a supor que a bacia do Karoo se instalou num rifte embrionário pré-Karoo devido ao reajustamento de estruturas precâmbrias. Esta bacia embrionária, à medida que se foi enchendo de sedimentos, foi progressivamente afundando-se (Afonso, 1986 in Paulino et al., 2009). Nesta bacia, as formações sedimentares distribuem-se desde o Pérmico Inferior ao Jurássico Inferior, e na sua parte sul encontram-se camadas de carvão.

### **2.2. Geologia Local**

O Graben de Metangula, anteriormente chamado por "mancha do Lago" ou "mancha de Maniamba", corresponde a uma bacia do grande sistema de graben estendendo-se na direcção NE-SW de Moçambique-Tanzânia. A geologia deste local foi estudada mais recentemente por Verniers et al. (1989). As rochas são sobretudo compostas por arenitos e siltitos e ocasionalmente argilitos e conglomerados (Verniers et al., 1989). Com base nas diferenças litológicas, as rochas do Graben de Metangula são divididas em três principais grupos: Karoo Inferior, Karoo médio e Karoo Superior (figura 2).

#### **2.2.1. Karoo Inferior**

As formações do Karoo inferior consistem em mais de 300 m de camadas de siltitos, arenitos e pequenos níveis carbonosos. Estão divididas em três formações nomeadamente: K2, K3 e K4 (Verniers et al., 1989).

A **Formação K2** a parte superior desta formação consiste em siltitos e argilitos finos, siltitos carbonosos, alguns veios de carvão e arenitos médios a finos. A região inferior consiste em alguns horizontes escuros com arenitos médios a grosseiros e níveis conglomeráticos contendo calhaus de diâmetro superior a 8cm e ocasionalmente cimento calcário, a parte basal desta formação consiste em um conglomerado que assenta sobre o embasamento pre-câmbrico. (Verniers et al., 1989).

A **Formação K3** consiste numa intercalação de arenitos cinzento-esverdeados com alteração esbranquiçada a clara, siltitos finos vermelhos e cinzentos e argilitos com pequenas camadas de arenito e siltitos finos compactados com coloração acinzentada a avermelhada, na parte inferior podem ser encontradas sequências fluviais de arenitos relativamente mais finos que a parte superior (Verniers et al., 1989).

A **Formação K4** consiste numa sequência de arenitos e siltitos verde acinzentada contendo várias camadas de carvão e intercalações carbonáceas. A parte superior da formação consiste em sequência fluvial de arenito fino que preservam fósseis de *Glossopteris ampla*, *Glossopteris browniana* e *Glossopteris indica*, sugerindo que a formação pertence ao Ecca (Verniers et al., 1989).

### 2.2.2. Karoo médio

As formações do Karoo médio consistem em cerca de 600 m ( Verniers et al., 1989) de camadas de argilitos avermelhados com presença de ossos de vertebrados atribuídos a répteis. Estão divididas em duas formações nomeadamente: K5 e K6 (Verniers et al., 1989), conforme resumido na tabela 1.

**Tabela 1:** Sequência estratigráfica do Karoo médio.

| Formação | Membro | Descrição   |
|----------|--------|---|
| K6       | K6b    | siltitos finos cinzentos a avermelhados, com uma sedimentação compacta. Possui fósseis de répteis em quase todo o seu domínio, nomeadamente: próximos a base, no centro e próximos ao topo (idade Beaufort)   |
|          | K6a3   | siltitos e argilitos finos acastanhados a esverdeados e por vezes amarelados, com estruturas de laminação esferoidal. Estes siltitos e argilitos são por vezes grosseiros, micáceos e laminados, podendo ser duros e conter conglomerados cinzento-acastanhados escuros |

|           |             |  |
|-----------|-------------|--|
|           | <b>K6a2</b> | siltitos finos vermelhos ou avermelhados com alguns conglomerados siltíticos duros e avermelhados e um horizonte contendo fósseis de répteis   |
|           | <b>K6a1</b> | siltitos e argilitos acinzentados de granulação fina, contendo calcilito finamente acamado ou laminado, variando acinzentados de granulação fina, contendo calcilito finamente acamado ou laminado, variando de castanho a avermelhado |
| <b>K5</b> | <b>K5c</b>  | formado por siltitos e argilitos finos cinzentos avermelhados com laminação esferoidal   |
|           | <b>K5b</b>  | siltitos são finos, médios a grosseiros, cinzentos esverdeados escuros e finamente acamados  |
|           | <b>K5a</b>  | siltitos finos cinzento avermelhados, podendo conter alguns arenitos com cimento calcítico, formando pequenas cristas Os fósseis de <i>Pelecypoda</i> são encontrados em siltitos finos avermelhados (Verniers et al., 1989).          |

Os membros K6a1, K6a2 e K6a3, contêm alguns fósseis de *Glossopteris* sugerindo assim uma idade Beaufort (Verniers et al., 1989).

### 2.2.3. Karoo Superior

O Karoo Superior consiste em cerca de 6000 m de sequências fluviais cíclicas depositadas contemporaneamente ao afundamento do graben. As formações do Karoo superior estão sumarizadas na tabela 2.

**Tabela 2:** Sequência estratigráfica do Karoo Superior.

| Formação               | Descrição  |
|------------------------|--|
| <b>Lipirichi (Kse)</b> | Sequências fluviais cíclicas. Arenitos finos a médios constituem cerca de 20% da espessura total da sequência. Apresentam arenitos rosa-pálidos ao longo do troço rio Magadge-rio Tulo. (Verniers et al., 1989).           |
| <b>Tende (Ksd)</b>     | Caracterizada por apresentar arenitos (10%) e siltitos avermelhados (90%). Os siltitos possuem nódulos de calcilunite esverdeados a avermelhados (Verniers et al., 1989).  |
| <b>Matchedge (KSd)</b> | Dominada por siltitos e arenitos finos dentro da sequência, embora possam ocorrer arenitos grossos (4-6 m) de grão médio, similar a formação de Tende (Verniers et al., 1989).   |
| <b>Mecondece (KSC)</b> | A sequência cíclica fluvial é predominantemente constituída por arenitos grosseiros a médios (70-90%) tipicamente esbranquiçados com calhaus argilíticos alongados (acima de 25 cm de diâmetro), próximos a base da mesma. |

|                        |  |
|------------------------|--|
| <b>Moola (KSc)</b>     | Continuação lateral da Formação de Mecondece   |
| <b>Congresso (KSc)</b> | similar as formações de Tende, Matchedge e partes das formações K5 e K6 (Karoo médio).As rochas predominantes nesta formação são siltitos com arenitos finos (Verniers et al., 1989).                                |
| <b>Fúbué (KSb)</b>     | Arenitos conglomeráticos médios a grosseiros. Ausência de sequências cíclicas fluviais no padrão sedimentológico da área, indicando, um sistema de deposição do tipo braided ou anastomosado (Verniers et al.,1989). |
| <b>Lilonga (KSa)</b>   | Sequência cíclica fluvial onde as rochas finas são geralmente castanho esverdeadas e a fracção de areia representa 10 a 50% da fracção total (Verniers et al., 1989).  |

#### 2.2.4. Pós Karoo ou Karoo Indeterminado

O Pós Karoo encontra-se dividido em três formações que estão sumarizadas na tabela 3.

Tabela 3: Formações do Pós Karoo.

| <b>Formação</b>  | <b>Descrição</b>   |
|------------------|--|
| <b>Tiambila</b>  | Composta predominantemente por siltitos avermelhados a arenitos esbranquiçados As sequências tendem a ser finas (variando de 1 a 4 metros) e as camadas são geralmente pouco consolidadas (Verniers et al., 1989). |
| <b>Lu-ulucia</b> | consiste em siltitos, argilitos, e arenitos menos agregados em relação as outras partes do graben. Um grande tronco fóssil de “ <i>Dadoxylon</i> ” foi encontrado nesta formação (Verniers et al., 1989).          |
| <b>Txiune</b>    | predominantemente constituída por rochas argilo-siltosas. Sua posição estratigráfica não é clara e acredita-se que provavelmente bordejada por falhas (Verniers et al., 1989).                                     |

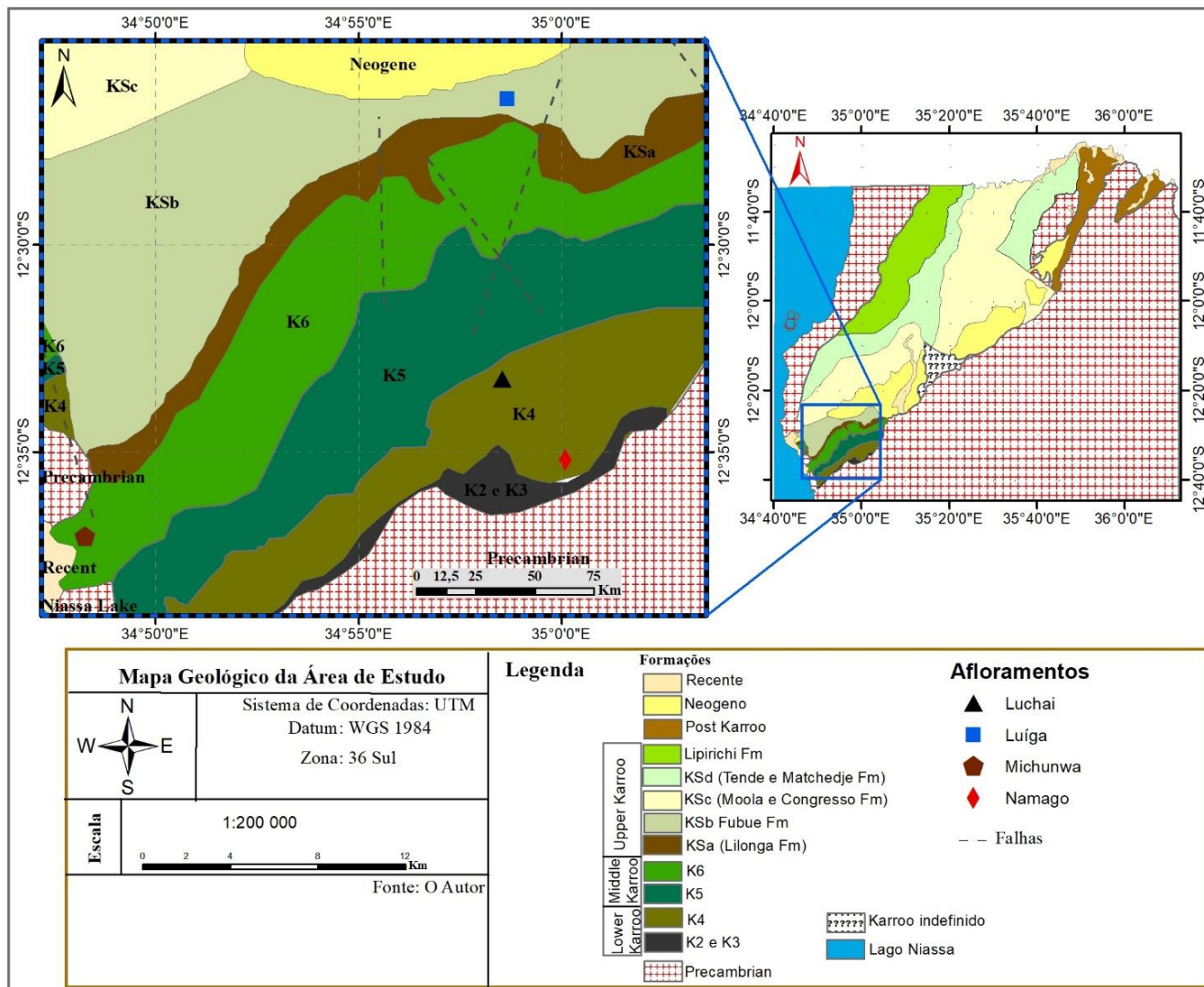


Figura 2: Mapa ilustrativo da geologia da área do estudo e os respectivos pontos de amostragem (adaptado de Verniers et al., 1989)

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. Sistema petrolífero

Sistema petrolífero é um conceito aplicado na geologia do petróleo que corresponde ao conjunto de elementos e processos relacionados com a formação e pesquisa de petróleo e gás (figura 3). Estes processos e elementos são interdependentes e constituem elementos-chave para a formação de hidrocarbonetos (Magoon e Dwo, 1994 in Machavate, 2020).

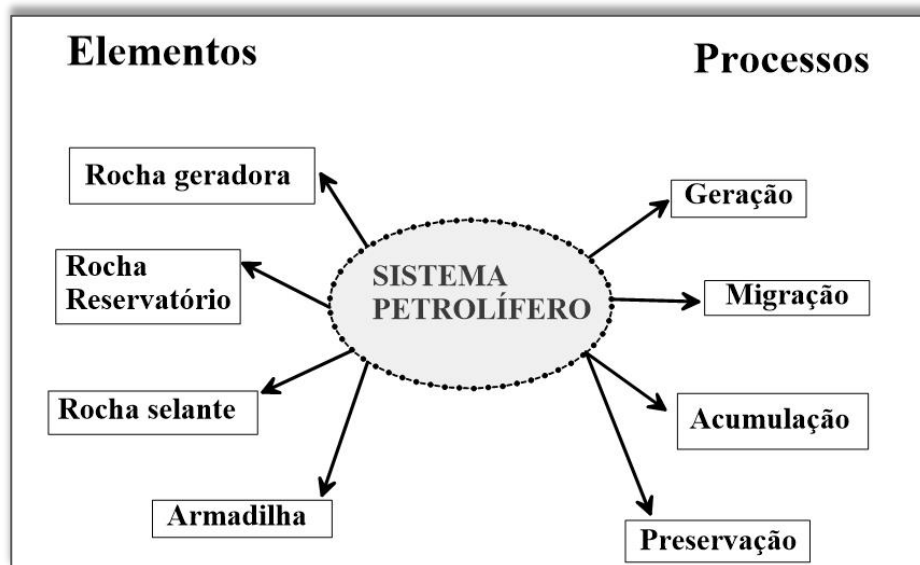


Figura 3: Elementos e processos do sistema petrolífero.(adaptado de Jon & Richard,2004)

**Rocha geradora:** É uma rocha sedimentar que contém matéria orgânica suficiente que quando submetida aos processos de soterramento e aquecimento pode produzir hidrocarbonetos (petróleo ou gás).(Jon & Richard, 2004)

**Rocha reservatório:** Rocha com porosidade e permeabilidade suficientes para armazenar os hidrocarbonetos e encontra-se envolvida por uma rocha selante. (Jon & Richard, 2004)

**Rocha selante:** unidade litológica com baixa permeabilidade capaz de restringir o fluxo dos hidrocarbonetos para fora da rocha reservatória. Este elemento normalmente compreende os xistos argilosos ou evaporitos (Magoon e Dwo, 1994 in Machavate, 2020).

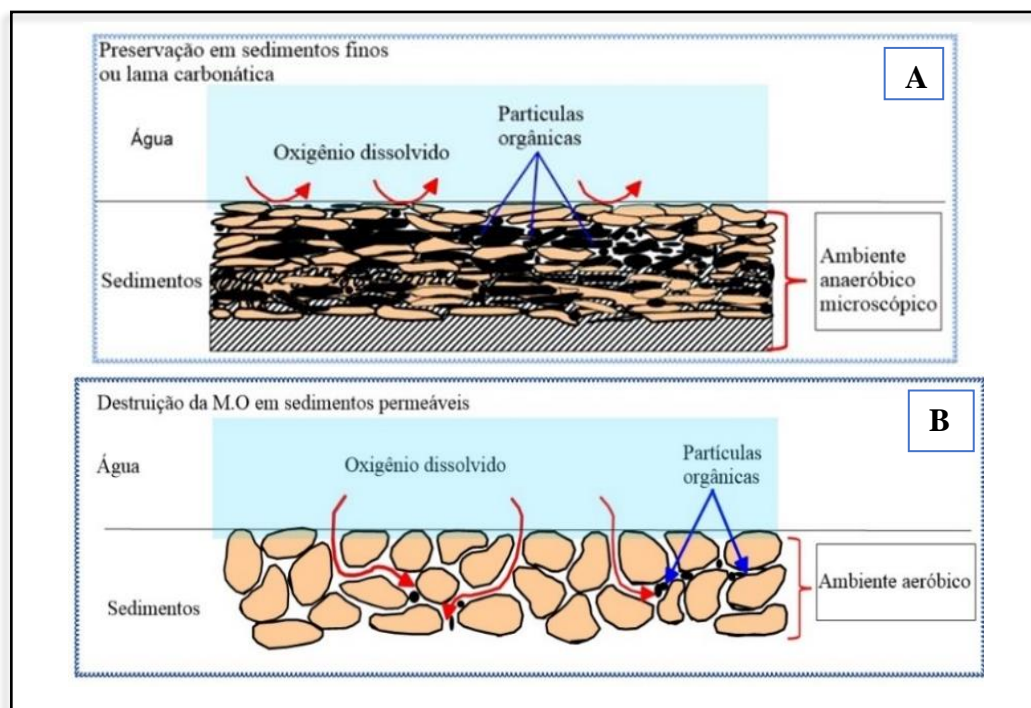
O presente estudo concentra-se no estudo da rocha geradora.

### 3.2. Rocha geradora e Matéria orgânica

Rocha geradora é qualquer rocha sedimentar que tenha a capacidade de gerar e expelir hidrocarbonetos suficientes para formar uma acumulação de petróleo e gás (Hunt 1996 in Coreia 2016). As rochas geradoras são caracterizadas pela presença da matéria orgânica acumulada e preservada juntamente com a deposição de rochas sedimentares de grãos finos. Estas rochas devem satisfazer três(3) requisitos geoquímicos: quantidade (um conteúdo mínimo da MO), qualidade (tipo de MO) e maturação térmica. No entanto, quando uma rocha não completa estes requisitos é designado potencialmente geradora (BALBINOT., 2012; Mendonça Filho et al., 2012).

#### 3.2.1. Preservação da Matéria orgânica

A acumulação da MO ocorre preferencialmente em ambientes de baixa energia e sem oxigénio (anóxico) que permitem a preservação deste material. Estes locais correspondem geralmente a pântanos, lagos e ambientes marinhos profundos de circulação restrita (figura 4). Nestes locais ocorre deposição de sedimentos finos associado a baixa energia, que limitam o excesso de oxigénio (criando uma anoxia), fazendo com que a MO sofra apenas a acção microbiana aumentando a preservação da mesma (Tissot & Welt, 1984).



**Figura 4:** Em sedimentos finos de argila ou carbonato, a água dos poros se torna um microambiente quase fechado e as condições anóxicas são rapidamente estabelecidas protegendo a MO (a). (b) Ocorrência de livre circulação de água contendo O<sub>2</sub> destruindo a MO (adaptado de Tissot & Welte, 1984)

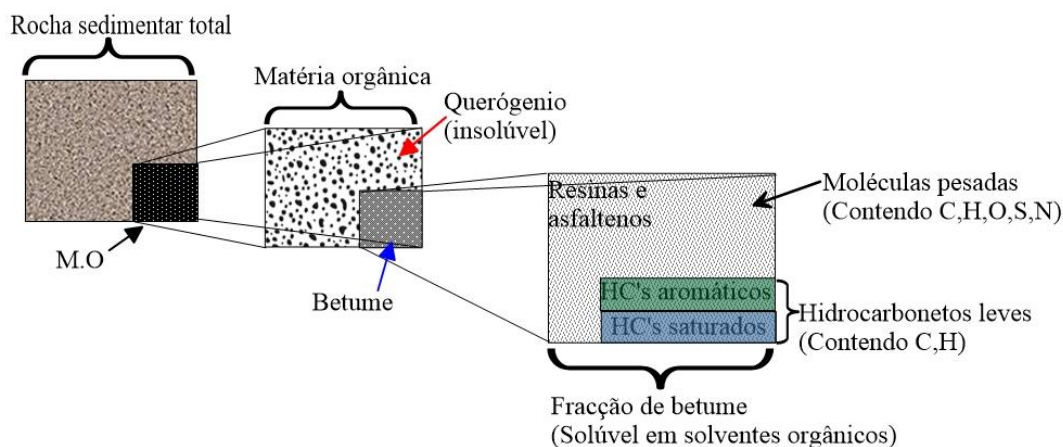
### 3.3. Querogênio.

As rochas sedimentares contêm geralmente MO preservada em teores inferiores a 0.5% por vezes associada a acumulações de hidrocarbonetos (Tissot & Welt, 1984). A composição desta MO (conteúdo e tipo) em rochas sedimentares pode flutuar dentro de poucos metros ou centímetros (Batten, 1981). A matéria orgânica é constituída por duas fracções, uma solúvel (Betume) e outra insolúvel em solventes orgânicos (Querogênio) (Mendonça Filho et al., 2012).

O Forsman & Hunt, 1958 definem querogênio pela primeira vez como sendo matéria orgânica dispersa de sedimentos antigos, insolúvel em solventes orgânicos usuais.

O Tissot & Welt.,1984 definem o querogênio como fracção insolúvel de matéria orgânica ou resíduo individual de rocha sedimentar depois duma dissolução completa da matriz da rocha por ácido clorídrico (HCl) e ácido fluorídrico (HF).

Portanto em palavras simples o querogênio é fracção particulada e o betume é a fracção molecular da matéria orgânica (Compostos saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos) (Mendonça Filho et al., 2012).



**Figura 5:** Composição da matéria orgânica disseminada em rochas sedimentares adaptado de (Tissot & welt,1985)

O Mendonça Filho et al., 2012 divide o querogênio em quatro (4) tipos, de acordo com as suas características físico-químicas:

**-Querogênio Tipo I:** Apresenta uma alta razão H/C e baixo O/C. Este compreende muito material lipídico, principalmente de cadeia alifática, com baixos núcleos poliaromáticos. Este tipo, é principalmente derivado de matéria orgânica algálica lacustrino ou de matéria orgânica



enriquecida em lípidos por acção microbiana (matéria orgânica amorfa). Apresenta um altíssimo potencial para geração de Hidrocarbonetos líquidos.

**-Querogênio Tipo II:** Este tipo é o mais frequente em muitas rochas geradoras, com razão de H/C relativamente alta. Quimicamente constituído por núcleos poliaromáticos e cetonas heteroatómicas e grupos de ácidos carboxílicos mais notáveis que do tipo I mas inferior que do tipo 3. Este tipo de querogênio compreende grãos de pólen, esporos, cutículas de plantas superiores e MO marinha depositada em ambiente redutor. Apresenta um alto potencial para petróleo.

**-Querogênio Tipo III:** Baixos valores de H/C e os valores de O/C são altos em relação ao tipo I e II. Este tipo é constituído essencialmente por núcleos poliaromáticos condensados e grupos funcionais oxigenados com cadeia alifática. Este tipo de querogênio é derivado de tecidos de plantas superiores terrestres e apresenta um alto potencial para gerar gás.

**-Querogênio Tipo IV:** Este é considerado querogênio secundário, provem de tecidos de plantas superiores carbonizadas (fitoclastos opacos). Este querogênio geralmente não apresentam potencial para geração, sendo que em alguns casos pode gerar gás seco.

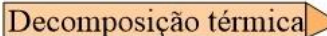

### 3.4. Maturação térmica da MO e formação de Hidrocarbonetos

As transformações que acompanham a evolução geológica de ambiente de sedimentação e história térmica dos mesmos, modificam a composição da MO .

O conjunto de processos físico-químicos pós deposicionais, designadamente a evolução da temperatura , pressão e o tempo que transformam a MO denomina-se maturação orgânica .

A matéria orgânica, após a sua deposição, passa por diversas transformações progressivas devido a aumento de soterramento e conseqüente aumento de temperatura e pressão, fazendo com que a MO se transforme progressivamente em querogênio, betume, óleo e gás, dependendo do grau de maturação térmica atingida pela rocha (Figura 6).

O querogênio pode ser classificado como imaturo, maturo e supermaturo e são consideradas quatro (4) fases de evolução térmica da MO que se verificam desde a deposição até á transformação final (metamorfismo). As fases compreendem a diagénese , catagénese, metagénese e metamorfismo (Tissot & Welt, 1984; Mendonça Filho et al., 2012;Fernandes, 2000)

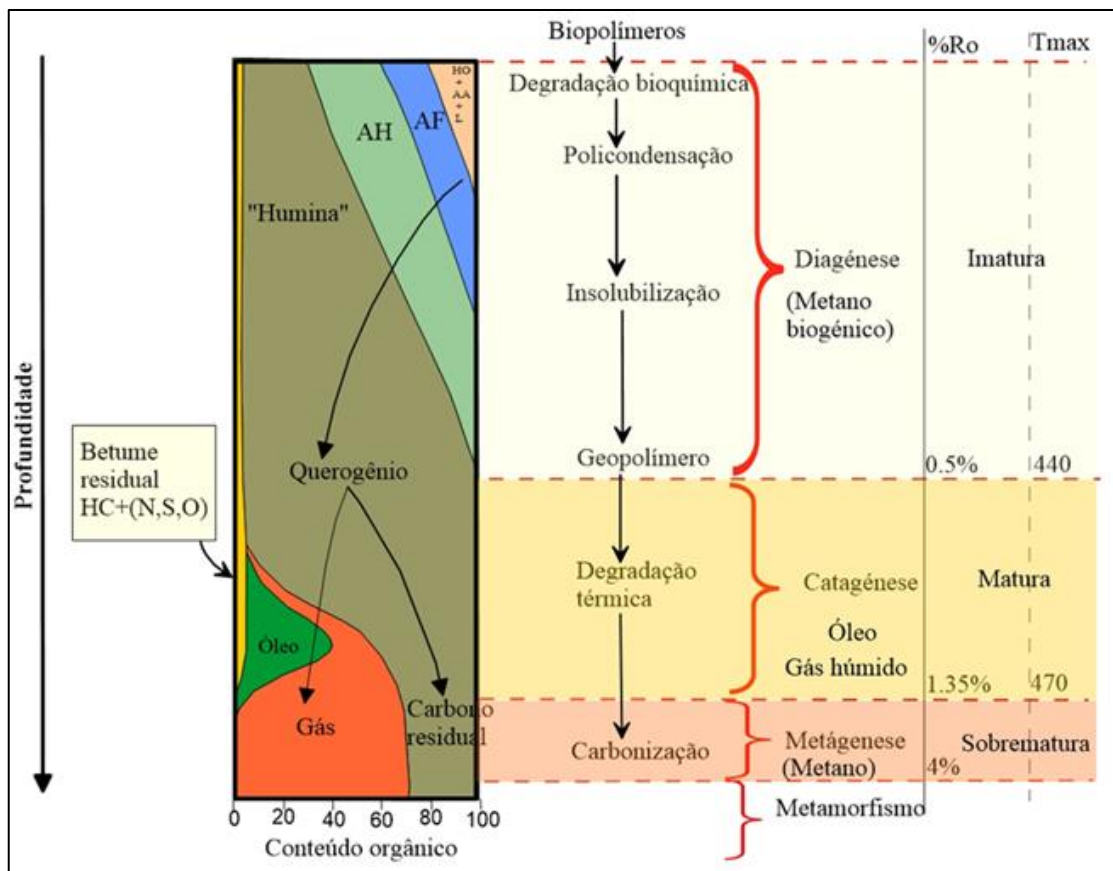
Querogênio  Betume  Óleo / Gás

A *diagénese* afecta a MO orgânica logo após a sua deposição onde é submetida a baixas temperaturas (até 50°C) a profundidades rasas. As rochas nesta fase são consideradas imaturas com um potencial de geração baixo. As partículas resultantes desta transformação sofrem pouca alteração e preservam as estruturas originais e são chamados de biomarcadores. No fim da diagénese a MO é constituída basicamente do querogênio.

A *catagénese* corresponde a segunda etapa da evolução da MO no qual verifica-se um aumento significativo da temperatura (que varia de 50- 150°C) e pressão devido a progressiva subsidência da bacia. Nesta fase o querogênio é considerado maturo e corresponde á “janela de geração do petróleo”.

A *metagénese* corresponde a última etapa de evolução da MO que antecede o metamorfismo. A temperatura é extremamente elevada (150-200°C) e a MO é considerada supermatura ou senil e reduz o seu potencial de geração de hidrocarbonetos . Ocorre craqueamento de hidrocarbonetos líquidos formando gás seco e a MO é constituído apenas por gás metano.

O *metamorfismo* é a fase de evolução caracterizadas por elevadíssima temperatura e pressão . Nesta fase a matéria orgânica residual existente nas rochas é transformada em grafite.



**Figura 6:** Evolução térmica da MO com a profundidade com conseqüente formação de óleo ou gás AA-aminoácidos , AH-ácidos húmicos, CH-Carboidratos, AF-ácidos flúvicos , L- lípidos ( adaptado de Tissot & Welt citado por (BALBINOT, 2012))

### 3.4.1. Refletância da Vitrinite

A vitrinite é um maceral que ocorre na constituição do querogênio de rochas sedimentares com idade compreendida desde o Devónico Inferior (Fernandes, 2000 in Correia, 2016) até à atualidade.

A temperatura na qual o craqueamento térmico de hidrocarbonetos pesados e querogênio atinge o máximo (Tmax) depende da natureza e maturidade do querogênio e corresponde ao seu nível de maturidade térmica. Deste modo, para comparar os dados das técnicas da refletância da vitrinite e pirólise Rock-Eval, um estudo feito nos xistos carbonosos de Barnett, nos Estados Unidos da América , em 2001 (Jarvie et al., 2001) produziram uma fórmula de conversão para calcular o poder refletor da vitrinite (%Ro) a partir de dados de Tmax. E a fórmula de conversão

(%Ro calculado =  $0,0180 \times Tmax - 7,16$ ) tem sido amplamente utilizado em bacias ao redor do mundo sendo estas pertencentes a diferentes idades e litologias (Wust et al.,2013).

Um estudo realizado pelo (Wust et al., 2013) nas formações de Duvernay, em Canadá, usando a fórmula de conversão de Jarvie et al 2001, constatou que esta fórmula pode apresentar um desvio padrão de cerca 0.3 %Ro, recomendando que a fórmula seja utilizada com alguma atenção nas formações onde uma fórmula de conversão ainda não tenha sido desenvolvida, como é o caso da bacia de Maniamba.

Pela correlação da refletância da vitrinite com outros parâmetros da maturação da rocha fonte pode se considerar alguns estágios de evolução térmica dos sedimentos (Tissot & Welt, 1984).

**Ro < 0.5 a 0.7 %** : estágio da diagénese, rocha geradora ainda imatura;

**0.5 a 0.7% < Ro <1.3%**: estágio da catagénese , janela de geração de óleo

**1.3% < Ro < 2%**: estágio da catagénese , zona de gás húmido

**Ro > 2%** : estágio da metagénese, apenas metano resta como único hidrocarboneto (gás seco);

A maturação térmica pode ser determinado por uma integração de diferentes parâmetros conforme apresentado na tabela 4.

**Tabela 4:** Correlação de parâmetros de maturação térmica e o estágio de maturação (adaptado de (Egbobawaye, 2017).

| Estágio da maturação térmica | Parâmetros de maturação |           | Índice de produção (PI) |
|------------------------------|-------------------------|-----------|-------------------------|
|                              | % Ro                    | Tmax (°C) |                         |
| Imatura                      | 0.2 - 0.6               | <435      | <0.10                   |
| <b>Matura</b>                |                         |           |                         |
| Inicial                      | 0.6 - 0.65              | 435 - 455 | 0.10 - 0.15             |
| Pico                         | 0.65 - 0.9              | 455 - 450 | 0.25 - 0.40             |
| Final                        | 0.9 - 1.35              | 450 - 470 | >0.40                   |
| Supermatura                  | >1.35                   | >470      | -----                   |

### 3.5. Análises Geoquímicas

#### 3.5.1. Carbono Orgânico Total (COT)

O quantitativo de MO em sedimentos é geralmente expresso como uma percentagem relativa de carbono orgânico numa amostra seca.

Em Mendonça Filho et al., 2012, o Jarvie 1991 e Bordenave et al 1993 consideram o COT como sendo medição de carbono orgânico total numa amostra de sedimento.

Tissot & Welte, (1984) afirmam que a quantidade de matéria orgânica presente em sedimentos é usualmente expressa através do conteúdo de carbono orgânico total, o qual inclui tanto a matéria orgânica insolúvel (querogênio) como a matéria orgânica solúvel (betume), sendo esta última, aproximadamente, 0,1% a 0,2% do conteúdo de carbono orgânico total.

Em Zago, 2015, o Runov 1958 estima que a quantidade mínima para que uma rocha siliclástica (Xisto carbonoso e siltitos) seja considerada geradora é de cerca de 0.5% .

Para Tissot & Welte, (1984), o valor mínimo de COT para que rochas siliclásticas sejam consideradas geradoras é de 1% e para rochas carbonáticas é de 0.5% de COT. Os mesmos valores foram considerados pelo (Eggbowaye, 2017) como sendo propostos pelo Peters, & Cassa, 1994). As análises de COT são determinadas em rochas muito finas num aparelho de combustão usando um forno, através da combustão de carbono orgânico em CO<sub>2</sub> numa atmosfera oxigenada numa rocha descarbonatada (remoção dos carbonatos por HCl).

**Tabela 5:** Critérios de caracterização de rocha geradora usando %COT( adaptado de Eggbowaye, 2017)

| Potencial gerador da rocha | COT em rochas siliclásticas (%peso) | COT em rochas carbonáticas (%peso) |
|----------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| Pobre                      | 0.0 - 0.5                           | 0.00 - 0.12                        |
| Razoável                   | 0.5 - 1.0                           | 0.12 - 0.25                        |
| Bom                        | 1.0 - 2.0                           | 0.25 - 0.50                        |
| Muito bom                  | 2.0 - 4.0                           | 0.5 - 1.00                         |
| Excelente                  | >4                                  | >1.00                              |

### 3.5.2. Pirólise Rock-Eval

O primeiro artigo que versa sobre o desenvolvimento e aplicação da Pirólise Rock-Eval, foi publicado por Espitalie et al (1977). É considerada a técnica mais acessível em termos dos procedimentos e o essencial na indústria do petróleo, que não precisa de isolamento do querogênio (Mendonça Filho et al., 2012).

A Pirólise Rock-Eval é uma decomposição termoquímica do querogênio pelo aquecimento da rocha fonte numa atmosfera inerte (na presença de gás Hélio), durante um período de aproximadamente 25 minutos e a temperatura aumenta cerca de 20 a 25°C por minuto. O resultado desta técnica é representado em forma de três (3) picos: P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> com suas áreas correspondentes S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub> e a T<sub>max</sub>.

**Pico P<sub>1</sub> (S<sub>1</sub>) (~300°C) :** Corresponde a hidrocarbonetos livres presentes na amostra, ou seja, hidrocarbonetos que já foram gerados naturalmente, antes da amostra ser submetida á pirólise e ficam retidos na rocha. São medidos em mgHc/g.rocha (miligrama de hidrocarbonetos por grama de rocha).

**Pico P<sub>2</sub> (S<sub>2</sub>) (300-550°C) :** Representa a quantidade de hidrocarbonetos que são gerados pelo craqueamento térmico do querogênio durante o processo da pirólise. Estes correspondem ao potencial gerador da rocha.

**Pico P<sub>3</sub> (S<sub>3</sub>) :** Corresponde a quantidade de CO<sub>2</sub> produzido pela quebra dos grupos carboxílicos dos componentes do querogênio. É medido em mgCO<sub>2</sub>/g.rocha (miligrama de CO<sub>2</sub> por grama de rocha).

**T<sub>max</sub> :** Corresponde a temperatura de máxima geração de hidrocarbonetos durante a pirólise (a temperatura na qual se atinge o máximo do pico S<sub>2</sub>). Este parâmetro é utilizado para o estudo maturação térmica da rocha.

Os valores ou parâmetros acima mencionados podem ser utilizados para o cálculo de outros parâmetros que são plotados no diagrama de Van kreveleen de modo a interpretar os tipos de querogênio presentes na amostra e o hidrocarboneto propenso a ser gerado. Tissot & Welt consideram dois parâmetros para análise do tipo de querogênio, o Índice de hidrogénio (HI) e o índice de oxigénio índice(OI) mas também pode se determinar o índice de produção (PI).

Índice de hidrogénio (HI):  $HI = \frac{S2}{TOC} \times 100\%$

Índice de oxigénio (OI) :  $OI = \frac{S3}{TOC} \times 100\%$

Índice de produção (PI) :  $PI = \frac{S1}{(S1+S2)} \times 100\%$

### 3.6. Palinostratigrafia

O termo Palinologia deriva da palavra grega *palunein* (pulverizar, dispersar) e do latim *pollen* (pó fino), (Hyde e Williams.,1944 in Correia, 2016).

Inicialmente, a palinologia dedicava-se apenas ao estudo dos esporos e pólenes. Contudo, nas últimas décadas houve um grande incremento dos estudos nesta área, surgindo a Paleopalinologia, que se dedica ao “estudo de todas as estruturas de parede orgânica que podem ser isoladas a partir da maceração de rochas sedimentares” (Jansonius & McGregor.,1996 in Borges et al., 2010).

#### 3.6.1. Palinomorfos

O conceito de palinomorfos engloba os microrganismos, fósseis ou contemporâneos, cuja parede orgânica é composta por esporopolenina, quitina ou “pseudoquitina”, com dimensões médias compreendidas entre 5 µm e 500 µm (Traverse, 2007). Os palinomorfos ocorrem quer em ambientes continentais (esporos e pólenes, designados esporomorfos), de água doce (algumas algas, dinoflagelados) assim como de água salgada (a maior parte dos dinoflagelados, acritarcas, outras algas microscópicas, quitinozoários, escolecodontes, foraminíferos) (Traverse, 2007 in Coreia,2016).

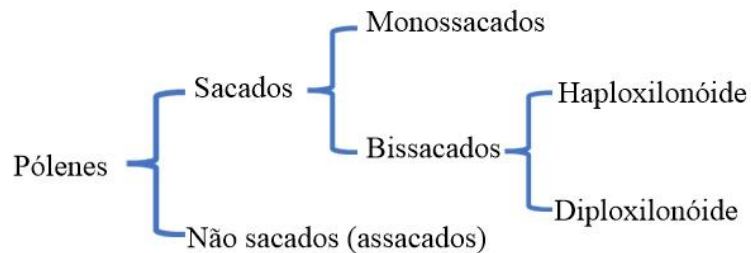
##### 3.6.1.1 Pólenes

A palavra pólen deriva do latim que significa pó fino. Os grãos de pólen são estruturas reprodutoras pertencentes ao ciclo de vida das plantas que produzem semente, as quais constituem o grupo das fanerogâmicas, que inclui gimnospérmicas e angiospérmicas (Jarzen & Nichols, 1996 in Coreia., 2016). Os primeiros registos fósseis de pólenes (pré-pólenes) remontam ao Devónico Superior-Carbonífero Inferior(Costa, 2015).

##### 3.6.1.2. Principais estruturas morfológicas dos pólenes .

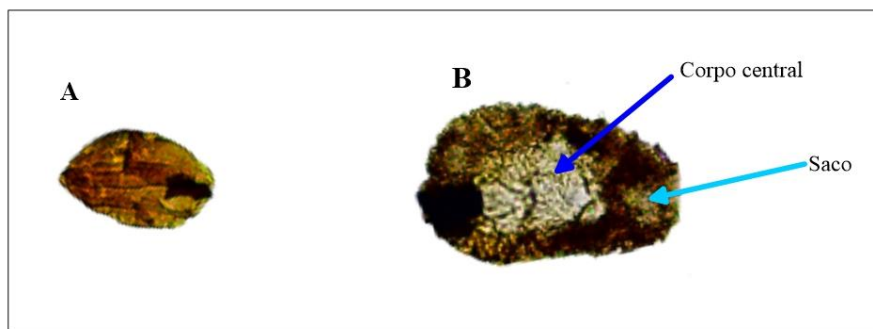
A identificação e classificação dos pólenes é feita com base na análise de algumas estruturas morfológicas que estes apresentam. A parede celular do pólen é designado de exina, esta é

quimicamente composta por esporopolenina e é dividida em duas camadas, uma interna (endexina) e outra externa (ectexina). Deste modo algumas estruturas morfológicas foram tomadas como base de identificação e classificação dos pólenes tais como: sacos, corpo central, estrias, ténias, contorno, e tipos de abertura da exina.



**Sacos** são bolsas formadas por extensão da exina e facilitam o processo de disseminação do grãos de pólenes (Ybert et al., 2012).

Os pólenes monossacados têm um corpo central rodeado por apenas um saco (Figura 7).



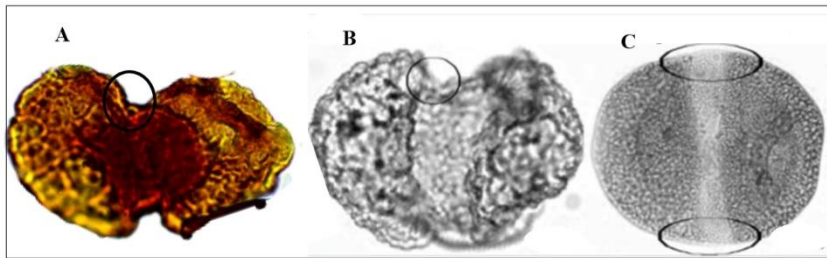
**Figura 7:** (A) pólen não sacado (assacado), (B) pólen monossacado, (Correia, 2016)

Os pólenes bissacados apresenta um corpo central rodeado por dois sacos. Os pólenes bissacados podem ser Haploxilonóides e Diploxilonóides de acordo com as características da conexão entre os sacos e o corpo (Figura 8).

**Haploxilonóide**- os sacos são contínuas em relação ao corpo ( podem ser confundidos com pólenes monossacados)



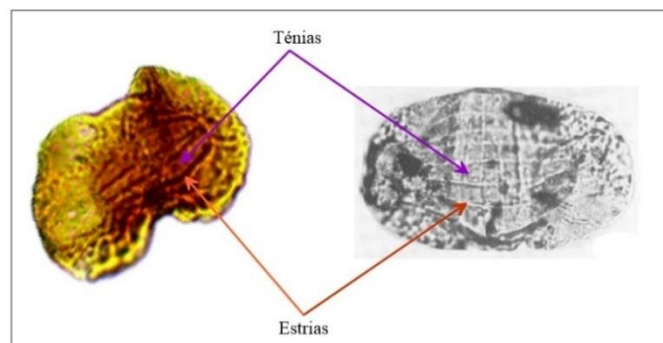
**Diploxilonóides** – quando os sacos forem descontinuas em relação ao corpo.



**Figura 8:** (A e B) pólen bissacado diploxilonóide (C) pólen bissacado haploxilonóide, adaptado de (Ybert et al., 2012)

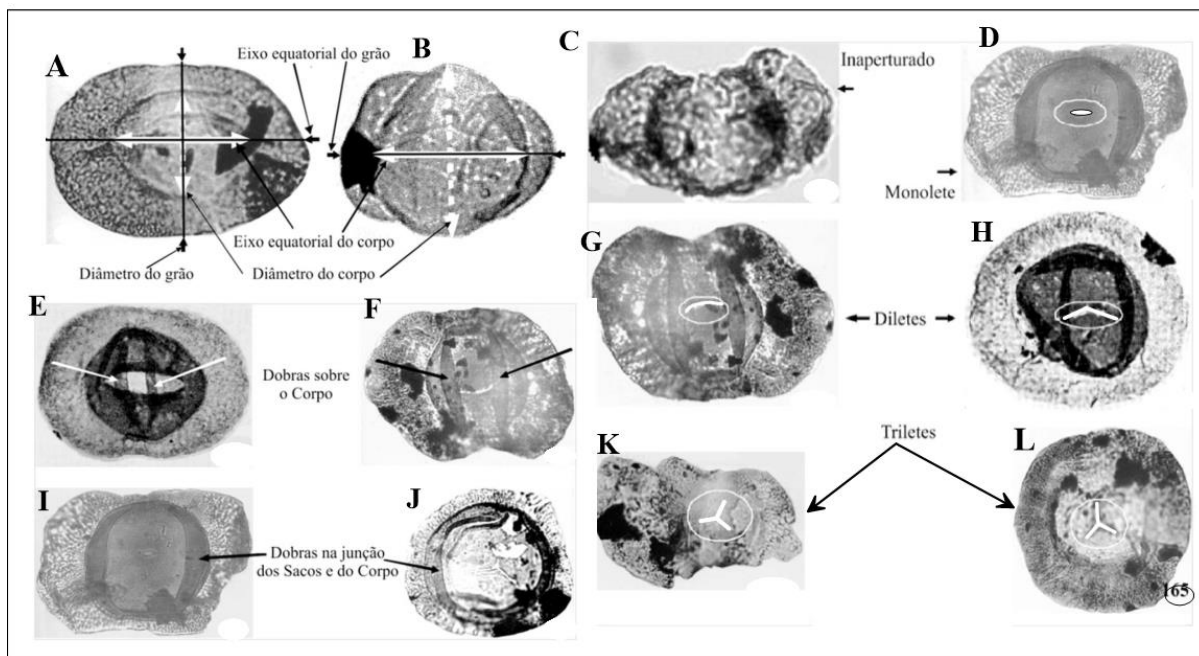
**Estrias:** são depressões muito finas e alongadas, paralelas e mais ou menos sinuosas se expandindo duma extremidade a outra do corpo central. Estas podem ser obliquas, paralelas ou anastomosadas em relação ao eixo equatorial.

**Ténia** é a faixa estreita compreendida entre duas estrias (Ybert et al., 2012).



**Figura 9:** ilustração de ténias e estrias em grãos de pólen bissacados, adaptado de (Ybert et al., 2012).

O *colpo* é uma abertura, na parede da exina, alongada e flexível (parte pode ser membranosa) que permite uma melhor acomodação da expansão do grão de pólen na fase de germinação (Correia, 2016).



**Figura 10:** ilustração de diferentes aberturas e dobras nos grãos de pólen. (A e B) diâmetro e os eixos de simetria dos grãos de pólen, (C) Pólen sem nenhuma abertura (inaperturado), (D) abertura em forma de uma linha recta (monolete), (G e H) abertura em forma de V (dilete), (K e L) abertura em forma de Y (trilete), (E & F) existência de dobras sobre o corpo central, (I e J) dobras na junção dos sacos e do corpo (Ybert et al., 2012).

### 3.6.2. Esporos

O termo esporo é utilizado para definir a célula reprodutora das plantas briófitas e pteridófitas. A produção dos esporos ocorre nos ciclos de vida das criptogâmicas ou “plantas inferiores”, onde se englobam estas plantas (Playford & Dettmann, 1996 in Correia, 2016).

Os esporos possuem um vasto registo paleobotânico, desde o Paleozóico Médio até aos dias de hoje, fruto da sua disseminação em sedimentos continentais e sedimentos junto à costa marinha. A sua grande dispersão deve-se à fácil mobilidade, por via do vento, água e insetos e também à natureza da parede dos esporos que é constituída por esporopolenina (Costa, 2015).

#### 3.6.2.1. Principais estruturas morfológicas dos esporos.

A morfologia (estrutura e ornamentação) é o principal e mais objetivo critério de classificação taxonómica dos esporos fósseis (Playford & Dettman 1996 in Correia, 2016 ; Castro, 2006; Ybert

et al., 2012 ). Assim, a descrição da forma, da simetria, da polaridade, bem como da ornamentação da exina é fundamental para a classificação dos esporos. Deste modo, para o presente estudo fez análise das seguintes estruturas: Contorno, simetria, abertura germinativa (trilete, monolete, alete), Laesura, presença ou não de ornamentação.

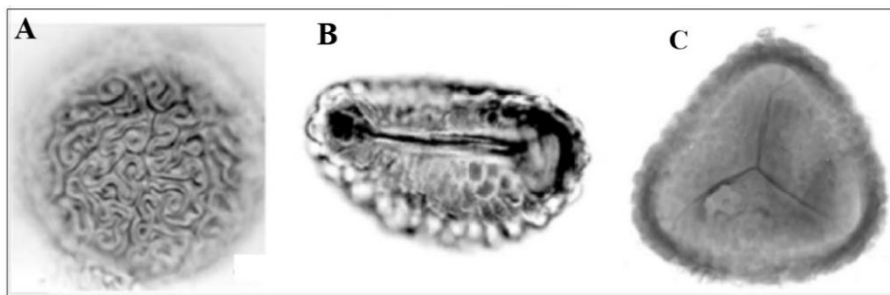
**Abertura germinativa** é uma região mais fina ou fenda que tem como função de formar uma abertura da parte interna do esporo durante a germinação (Ybert et al., 2012).

A classificação essencial dos esporos é baseado na marca germinativa e no contorno equatorial, de acordo com marca germinativa os esporos podem ser: Aletes, monoletes e triletes, conforme ilustrado na figura 11.

**Esporo Alete:** esporo sem marca germinativa;

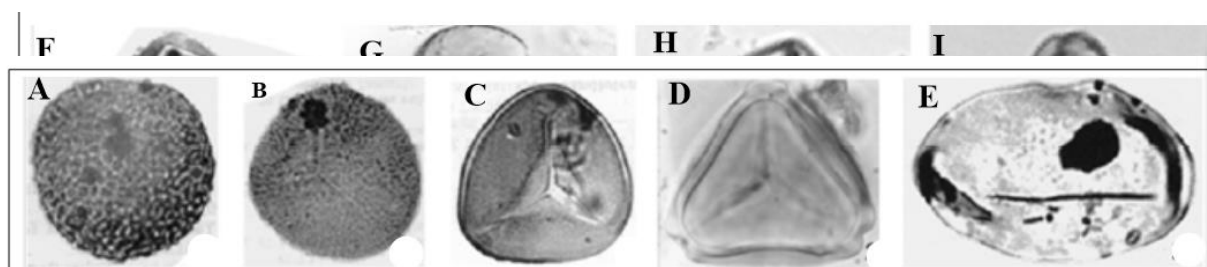
**Esporo monolete :** esporo com uma laesura simples, apresenta-se como um corte mais ou menos retilíneo;

**Esporo trilete:** esporo com uma abertura germinativa em forma de “Y” ou três lesuras.



**Figura 11:** representação dos diferentes esporos de acordo com a marca germinativa, (A) esporo alete,(B) esporo monolete, (C) esporo trilete (Ybert et al., 2012).

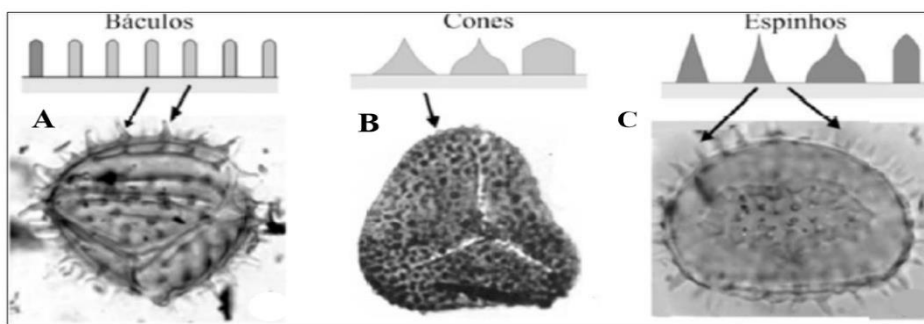
Quanto ao contorno os esporos podem apresentar contorno circular, subcircular , subtriangular, triangular e elíptico . O contorno triangular ocorre em esporos triletes e o contorno elíptico ocorre



em esporos monoletes. Desta forma nas formas triangulares os lados podem rectos, côncavos, convexos ou ondulados (Figura 12) .

**Figura 12:** Ilustração dos contornos e lados dos esporos. (A) contorno circular, (B) subcircular, (C) subtriangular, (D) triangular, (E) elíptico, (F a I) lados rectos, côncavos , convexos e ondulados respectivamente (Ybert et al., 2012).

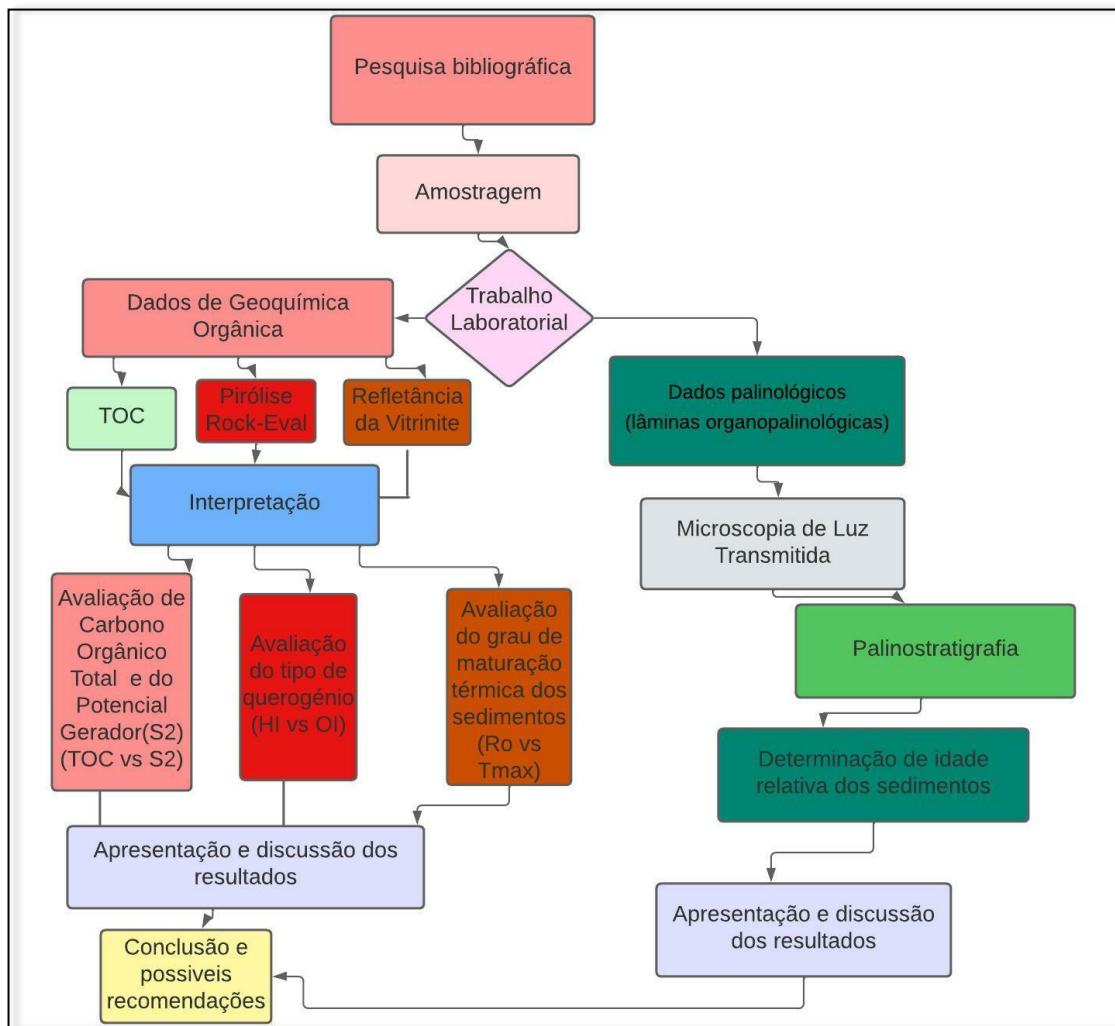
**Ornamentação** termo usado para designar particularidades morfológicas da superfície dos esporos. Os esporos lisos ou que não apresentam ornamentação são designados esporos laevigados. Porém, os esporos ornamentados podem apresentar várias estruturas individuais e isoladas, tais como: Báculos, cones e espinhos (Ybert et al., 2012).



**Figura 13:** Algumas estruturas de ornamentação segundo (Ybert et al., 2012)

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o alcance dos objectivos traçados as actividades foram realizadas de acordo com o fluxograma representado na figura 14.



**Figura 14:** Fluxograma de actividades seguidas para elaboração do presente projecto científico.

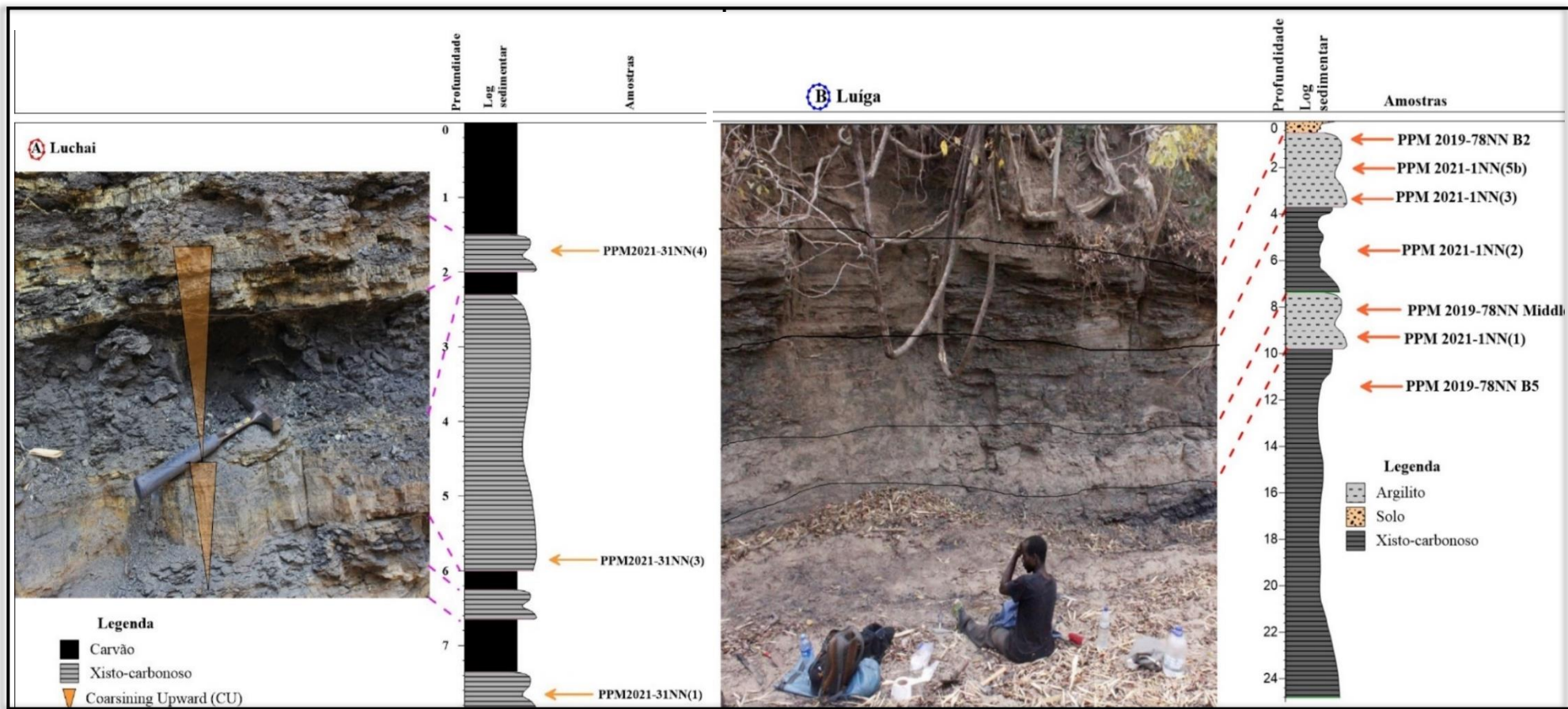
##### 4.1. Pesquisa Bibliográfica

A pesquisa bibliográfica consistiu na consulta bibliográfica de literatura relacionada com fundamentos teóricos da palinostratigrafia, maturação térmica dos sedimentos e colecção dos artigos sobre trabalhos de avaliação do potencial gerador com destaque a Tissot e Welt 1984, Tyson e Bider 1995, J.G Mendonça Filho 2012 entre outros, presente no Museu Nacional de Geologia e por meio de internet.

## 4.2. Amostragem

A colheita das amostras, para análise de matéria orgânica, foi feita em alguns afloramentos seleccionados ao longo da bacia de Metangula, seguindo uma amostragem sistemática do modo a reduzir os erros da amostragem. Não foram recolhidas amostras em níveis que, por sua vez, demonstrassem evidências de intensa meteorização ou rochas em que a litologia é constituída por sedimentos mais grosseiros, pois não são favoráveis para a preservação da matéria orgânica. As amostras foram colhidas preferencialmente em rochas de granulometria fina e coloração escura tais como siltitos e argilitos e alguns arenitos escuros e cinzentos, pois estas rochas apresentam maior afinidade com matéria orgânica e criam condições ótimas para a preservação da mesma (Tyson, 1987). No presente trabalho foi colhido um total de 23 amostras.

Durante o processo de amostragem, foram usado instrumentos como: **GPS**: para indicar a localização exacta dos pontos amostrados, **Martelo**: é o instrumento principal utilizado para a colheita das amostras, **Fita métrica**: usado para medir a profundidade em que cada amostra foi retirada e **Sacos plásticos**: utilizados para armazenar e rotular as amostras de modo a evitar a contaminação das mesmas (Figura 15).



**Figura 15:** Logs sedimentar de amostragem dos afloramentos e as respectivas profundidades e litologias nas quais cada amostra foi retirada. (A)- Luchai, B- Luíga.

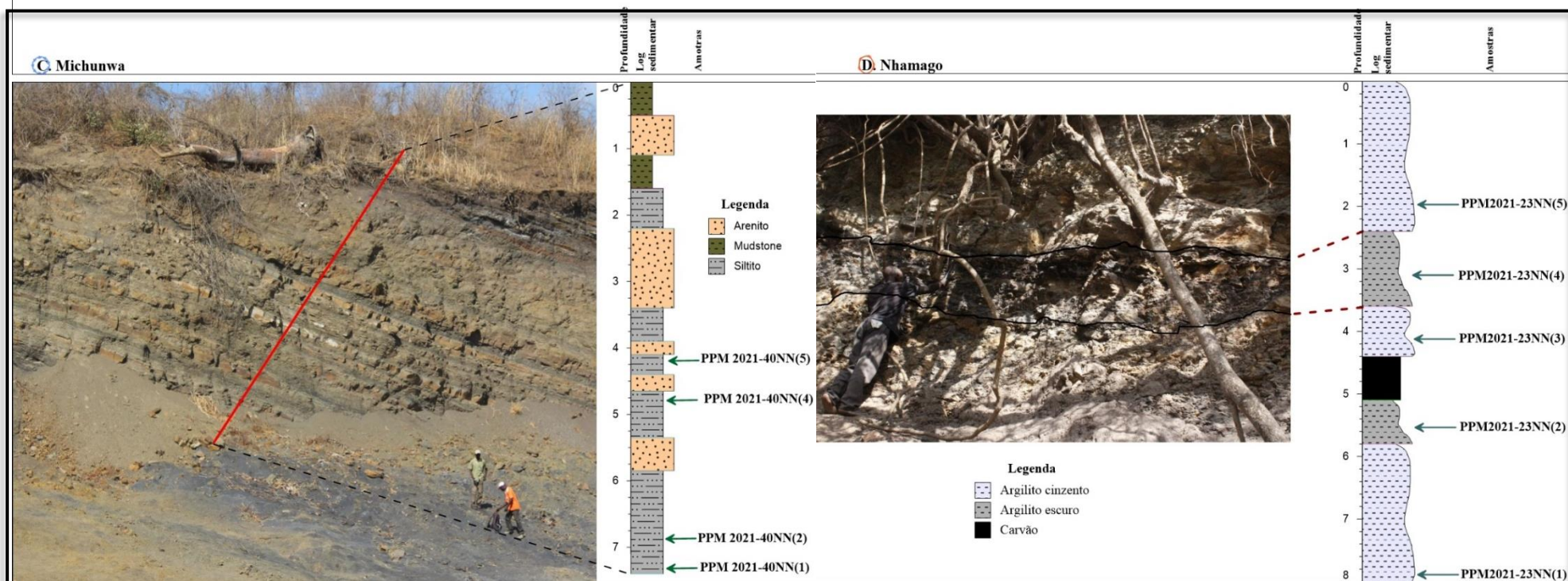


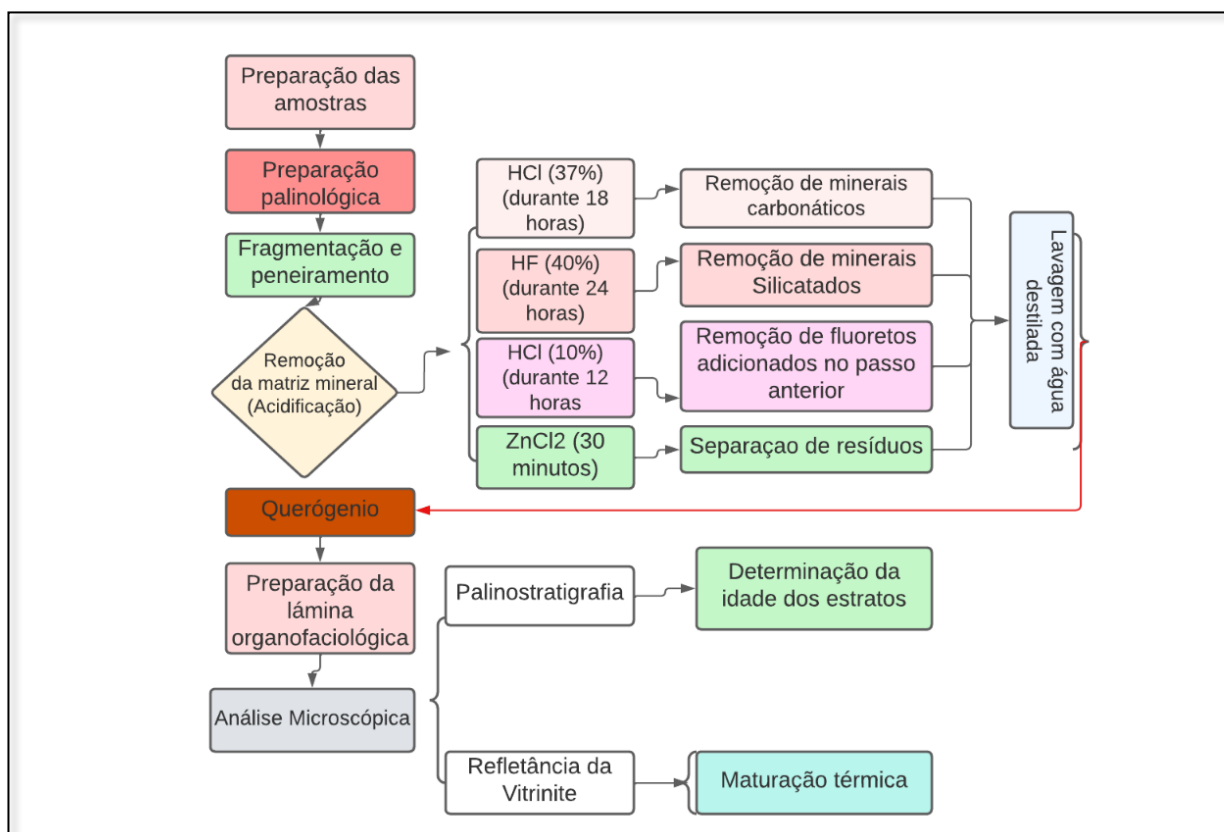
Figura 16: Logs sedimentar de amostragem dos afloramentos e as respectivas profundidades e litologias nas quais cada amostra foi retirada. (C)- Michunwa, D- Nhamago.



### 4.3. Trabalho laboratorial

#### 4.3.1. Preparação para análise palinostratigráfica.

Vários trabalhos laboratoriais foram realizados de modo a se obter dados para o estudos palinológicos. Os trabalhos laboratoriais para a obtenção dos dados palinológicos, baseou-se em procedimentos palinológicos padrão descritos por Tyson(1995) utilizados em (Spigolon, 2003). Os trabalhos laboratoriais foram todos efetuados no Laboratório da escola de geociências da Universidade Witwatersrand na África do Sul. No procedimento laboratorial aplicado são reconhecidas quatro fases distintas : fracionamento físico, desmineralização, concentração do resíduo orgânico e montagem e estudo das amostras (Deaf, 2009) , que serão descritas conforme o fluxograma representado na figura 17.

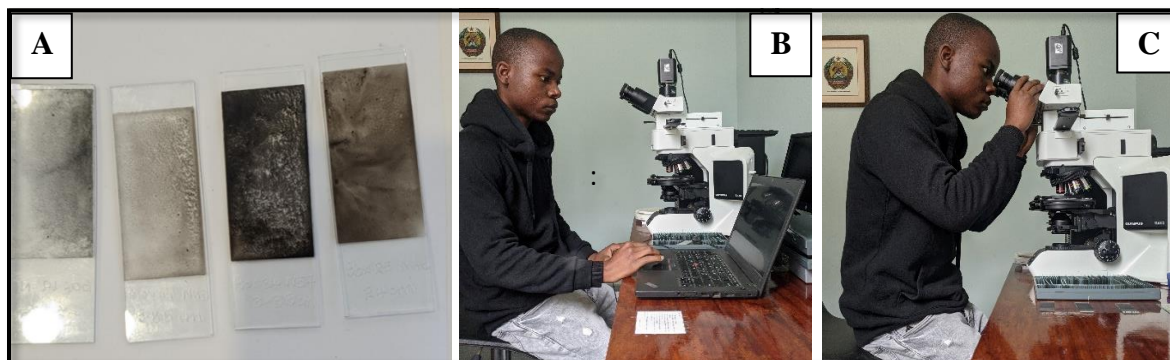


**Figura 17:** fluxograma de actividades laboratoriais para análise palinostratigráfica baseado em Tyson 1995 citado em Spigolon 2003.

### Lâmina palinológicas e estudo das amostras

Ao resíduo resultante das fases de acidificação (Querogênio) e após este ser armazenado nos frascos de plástico, são adicionadas algumas gotas de dispersante (hidroxietilcelulose), para facilitar a dispersão das partículas aquando da sua montagem em lamelas. Distribui-se a amostra palinológica por lamelas de vidro. Após o período de secagem, as lamelas foram montadas em lâminas delgadas, devidamente identificadas, com recurso a um meio de montagem (resina acrílica – Entelan®). O tempo de secagem da resina foi cerca de vinte e quatro horas, após o qual as lâminas se encontravam prontas para observação (Figura 18-A).

Para cada amostra foi observada uma lâmina considerada productiva, a que apresentava pelo menos 250 esporomorfos<sup>1</sup>. No entanto, para as lâminas que não apresentavam 250 esporomorfos, contou-se o máximo de espécimes possíveis. O estudo microscópico realizou-se no microscópio ótico de luz transmitida Olympus BX43, equipado com uma câmara fotográfica digital (EP 50), existente no Museu Nacional de Geologia (Figura 18B e C).



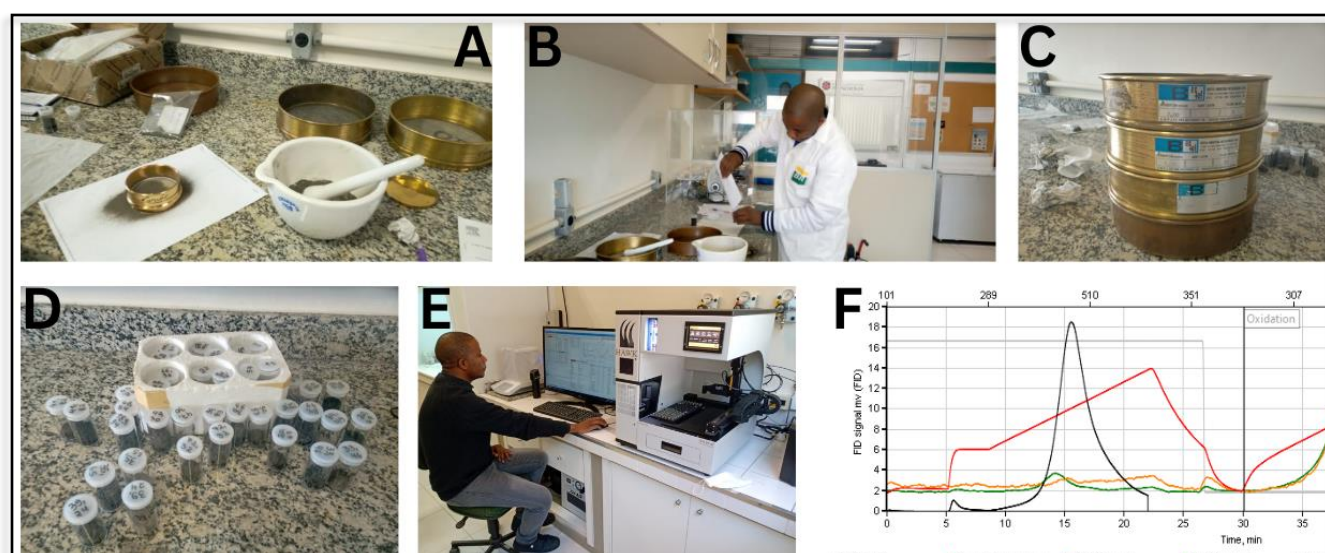
**Figura 18:** (A) lâminas organopalinológicas prontas para análise microscópica (B) fase de obtenção de microfotografias e (C) Contagem de palinomorfos existentes em cada lâmina.

#### 4.3.2. Preparação para análise de Geoquímica Orgânica (Pirólise Rock-Eval e Carbono Orgânico Total)

Num total de 23 amostras colhidas, foram preparadas 16 amostras para as análises geoquímicas. O procedimento para análises geoquímicas consistiu na trituração da amostra (Figura 19: A e B), o resíduo triturado foi posteriormente levado para um sistema de peneiros organizados em ordem decrescente das aberturas (9,16 e 60 mesh do topo a base) conforme a figura 19-B. Deste

<sup>1</sup> Esporomorfo trata-se palinomorfos derivados plantas superiores (grãos de polen e esporos)

procedimento, as partículas retidas no peneiro 16 mesh, são utilizados para a petrografia orgânica (refletância da vitrinite) e para a geoquímica orgânica é aplicada a fracção retida no peneiro 60 mesh. Após a recolha, o material é rotulado, indicando o respectivo peneiro de retenção. Por fim, o material indicado para a geoquímica orgânica é levado para o instrumento da análise de pirólise rock-eval, o qual é programado para fazer leitura durante dez (10) horas. Para o presente estudo foi utilizado Rock-eval 6 (HAWK), com a capacidade de fornecer dados da Pirólise e Carbono Orgânico Total em simultâneo. Estes procedimentos foram feitos no Instituto de geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) no Núcleo de estudos de carvão e Rochas Geradoras de Carvão, Brasil.



**Figura 19:** Fases de preparação laboratorial para análises geoquímicas realizadas pelo supervisor. (A e B) etapa da trituração das amostras, (B) peneiros usados para seleção de partículas com granulometria ótima (60 mesh), (D) amostras prontas para serem submetidas às análises, (E) aquisição dos resultados das análises geoquímicas, (F) Pirograma resultante da análise de pirólise Rock-eval.

#### 4.4. Processamento dos dados

Na fase de processamento dos dados foram utilizados os seguintes softwares: **Arcgis (Arcmap):** para processamento de mapas. **Strater 5:** Para elaboração de *log* sedimentar e ilustração da distribuição do palinomorfos e variação dos parâmetros da geoquímica orgânica vs profundidade. **Grapher 14:** Para produção dos gráficos geoquímicos, **ImageJ:** Para o processamento das microfotografias. **Canva:** Para produção de estampas para os apêndices.

## 5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os afloramentos analisados encontram-se distribuídos nas formações K4 (Pérmico inferior), K6 (Pérmico médio) e Ksb (Pérmico superior)

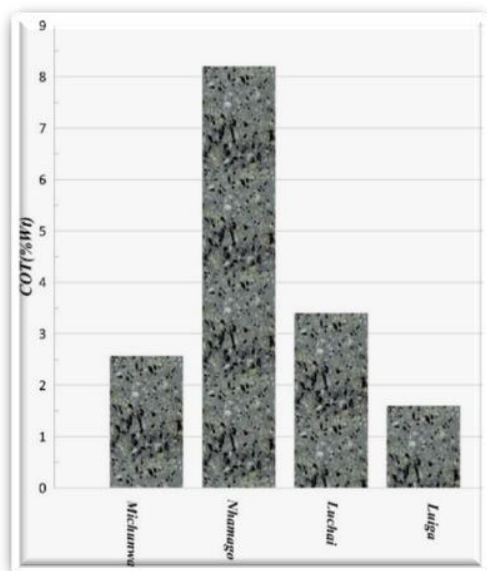
### 5.1. Geoquímica orgânica

Os resultados das análises geoquímicas encontram-se resumidos no apêndice 1 e em diagramas apresentadas nesta secção. Os resultados de COT, pirólise Rock-eval e refletância da vitrinite são comparados com tabelas 1 e 2 apresentadas no capítulo anterior de modo a determinar: i) Potencial gerador da rocha, ii) Qualidade da matéria orgânica (tipos de querogênio) iii) presença de possíveis fontes de contaminação ou de hidrocarbonetos migrados iv) maturação térmica da matéria orgânica estudada. Os *logs* geoquímicos que mostram a variação dos parâmetros geoquímicos são apresentados no apêndices 2,3,4 e 5.

#### 5.1.1. Carbono orgânico total

O COT foi analisado considerando a distribuição das amostras por afloramentos e consequentemente por formação. Os resultados encontram-se sumarizados na tabela de apêndice 1 e figura 20. De modo geral, os valores do COT para os afloramentos analisados variam de 0,87(PPM20121-1NN3) - 37,56 % Wt (PPM2021-23NN5). Em termos médios os valores do COT encontra-se distribuídos da seguinte forma: Michunwa(2,57 %wt) , Luchai (3,7%wt), Luiga(1,6%wt) e Nhamago (8,3%) estes resultados mostram que a formação K4 (Nhamago e Luchai) é a que apresenta maior conteúdo de carbono orgânico na bacia.

A maioria das amostras analisadas apresentam valores de COT acima de 2% enquanto que a quantidade mínima para uma rocha siliclástica ser considerada geradora é de 1%. Estes altos valores de COT mostram um enriquecimento orgânico nas amostras analisadas, o que sugere um paleoambiente redutor ou anóxico durante a deposição destas rochas que teria contribuído para melhor preservação da matéria orgânica.



**Figura 20** : gráfico de concentrações médias de COT em afloramentos.

### 5.1.2. Pirólise Rock-eval

O COT é um bom indicador para o enriquecimento da MO mas raramente pode descrever com precisão uma rocha fonte. Então dados adicionais vindo da pirólise Rock-eval são necessários. Os resultados da pirólise estão representados na tabela de apêndice 1. Os parâmetros S2, HI, OI, Tmax foram correlacionados com a profundidade, COT e entre si, nos diagramas que serão apresentados nesta secção e logs geoquímicos estão representados nos apêndices. De modo geral, os valores do S1 (hidrocarbonetos livres) para os afloramentos analisados variam de 0-0,41 mgHC/g.rocha. e os valores de S2 variam de 0,04(PPM20121-1NN3 - Luíga) a 23,50 mg/g.rocha (PPM2021-23NN5 - Nhamago). Estes valores mostram uma variação de qualidade de geração que varia de pobre a excelente para a geração de hidrocarbonetos. O potencial gerador (GP) que corresponde a soma de hidrocarbonetos livres e os produzidos pelo craqueamento térmico (S1+S2), varia de 0,04(PPM20121-1NN3 - Luíga) a 23,66 mgHC/g.rocha (PPM2021-23NN5 - Nhamago). Em termos médios os valores de potencial gerador (GP) encontra-se distribuídos da seguinte forma: Michunwa (0,44) , Luchai (0,7), Luíga(1,3) e Nhamago (5,1) estes resultados mostram que a formação K4 é a que apresenta maior potencial para a geração de hidrocarbonetos.

O índice de hidrogénio (HI) varia de 3 (PPM20121-23NN3 - Nhamago) a 143 mgHC/g.rocha (PPM2021-23NN5 - Nhamago), em contrapartida os valores de índice de oxigénio (OI) variam de

9 a 81 mgHC/g.rocha. o excesso de amostras com valores de HI relativamente menores (<100) e OI (<50) demonstra que o querogênio é derivado de material de origem terrestre (Khan et al., 2022).

Os valores de Tmax encontram-se entre 428 (PPM2021-23NN5 - Nhamago) a 550°C (PPM2021-23NN1 - Nhamago) o que mostra que a matéria orgânica é essencialmente matura a Supermatura para a geração de hidrocarbonetos.

### **5.1.3. Refletância da Vitrinite**

Os valores da refletância da vitrinite foram obtidos a partir dos resultados de Tmax obtidos no método da pirolise utilizado a equação de Jarvie 2001. Os resultados da Refletância da vitrinite calculado (Ro calculado) estão apresentados na tabela do apêndice 1. Os valores da refletância variam de 0,54 (PPM2021-23NN5 – Nhamago) a 2,72 %Ro (PPM2021-23NN1), o que corrobora com os valores de Tmax, mostrando que estas rochas encontram-se no estado maduro a supermaturo.

## **5.2. Potencial de gerador da rocha**

O potencial gerador das amostras estudadas foi avaliada usando os plotes de S2 vs COT, GP vs COT, Tmax vs PI e HI vs COT (figura 21-A a D).

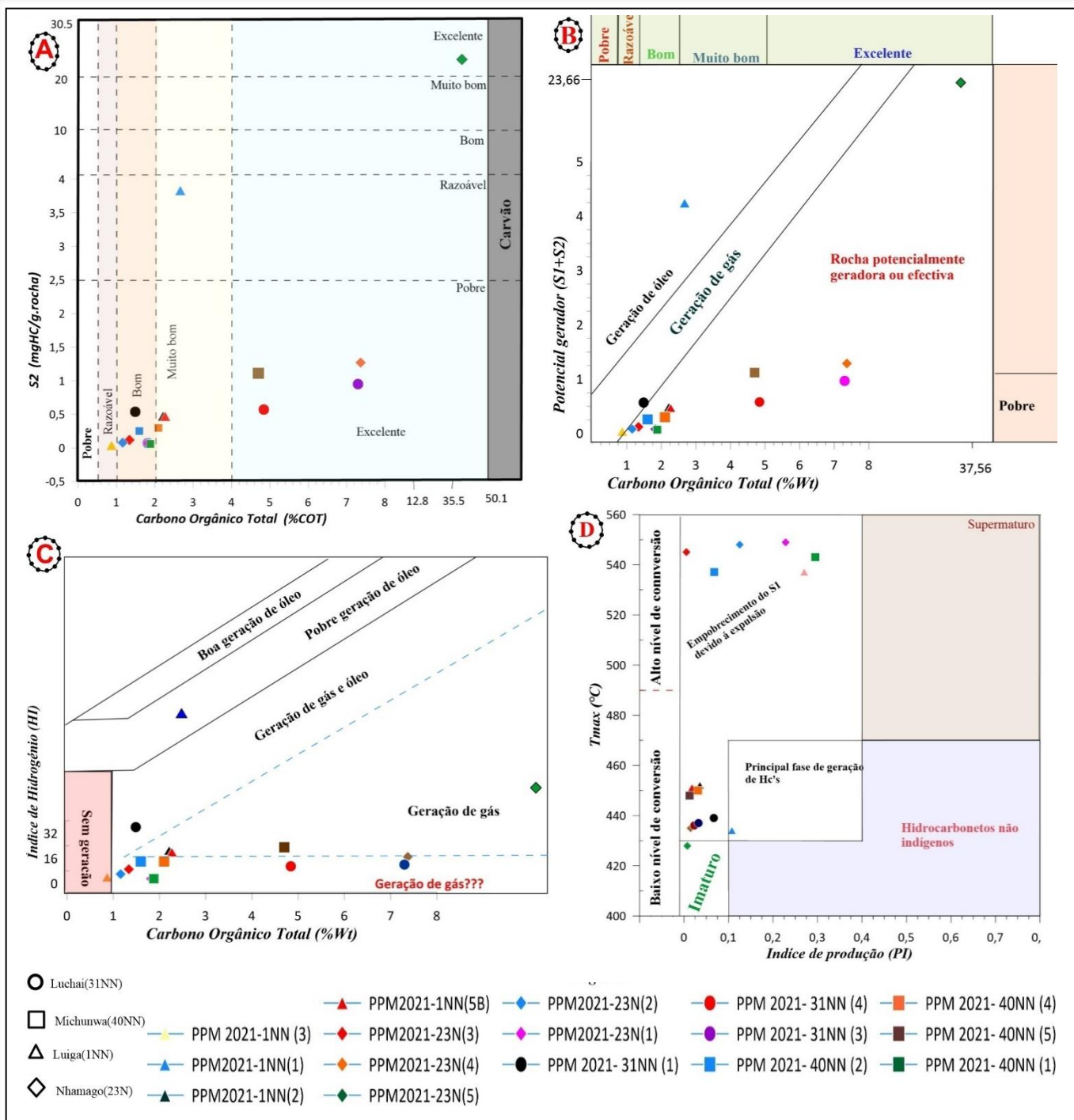
Os valores do COT das amostras de xistos carbonosos e argilitos dos afloramentos estudados apresentam um valor de COT acima de 1% com exceção da amostra PPM 2021 1NN(2), proveniente do afloramento de Luíga formação Ksb, que apresenta um valor de 0,87% do COT.

Para o afloramento de Nhamago o valor mínimo de COT é de 1,16% e um máximo de 37,56% e uma média de 8,3%. Estes valores classificam este afloramento de bom a excelente para a geração de Hidrocarbonetos. O afloramento de Luchai apresenta um mínimo de 1,49% e um máximo de 7,3% de COT com uma média de 3,7%. Estes valores são classificados de bom a excelentes para a geração. Para o afloramento de Michunwa os valores de COT variam de 1,6 a 4,7% de COT, sendo classificado de bom a excelente. E o afloramento de Luíga apresenta os valores mais baixos de COT variando de 0,87 a 2,67% de COT sendo classificado de razoável a muito bom para a geração. De um modo geral, em termos quantitativos estes valores de COT obtidos sugerem que

os xistos carbonosos e argilitos estudados apresentam um potencial para geração de hidrocarbonetos (figura 21-A).

Os valores de S1 (hidrocarbonetos livres) obtidos da pirólise Rock-eval são negligenciáveis para as amostras PPM 2021-40NN2 (Michunwa), PPM 2021-23NN3 (Nhamago), PPM2021-23NN2 (Nhamago), PPM 2021-1NN3 (Luíga) e PPM2021-1NN5B (Luíga) o que sugere que a migração de hidrocarbonetos já tenha ocorrido (Khan et al., 2021). E para o restante das amostras analisadas os valores de S1 são baixos variando de 0,01 a 0,41 mg HC/g.rocha com uma média de 0,063 mg HC/g.rocha o que sugere uma baixa taxa de conversão natural de querogênio em hidrocarbonetos (figura 21-D). A relação entre Tmax e o índice de produção (PI) pode ser usada para distinguir hidrocarbonetos indígenas e não indígenas, deste modo, todas as amostras estudadas apresentam hidrocarbonetos produzidos in situ sem possíveis fontes de contaminação, isto é, o valor de hidrocarbonetos livres (S1) corresponde ao conteúdo orgânico destas rochas (figura 21-D).

A relação entre o potencial gerador (PG) e COT mostra que as formações estudadas apresentam um potencial que varia de pobre a excelente (figura 21-B). Do outro lado o plot de HI e TOC demonstra um potencial para gerar óleo e gás (figura 21-C).



**Figura 21:** Plotes de rochas fonte ilustrando as características geoquímicas dos afloramentos: A S2 vs COT ilustrando tipos e qualidades das rochas fonte (adaptado de Egbobawaye, 2017) B Potencial gerador (GP) vs COT ilustrando os tipos e qualidades de hidrocarbonetos esperados (adaptado Khan et al., 2022). C potencialidades de geração das rochas fonte usando HI vs COT (adaptado de Khan et al., 2022 ;(Alaug et al., 1866)).

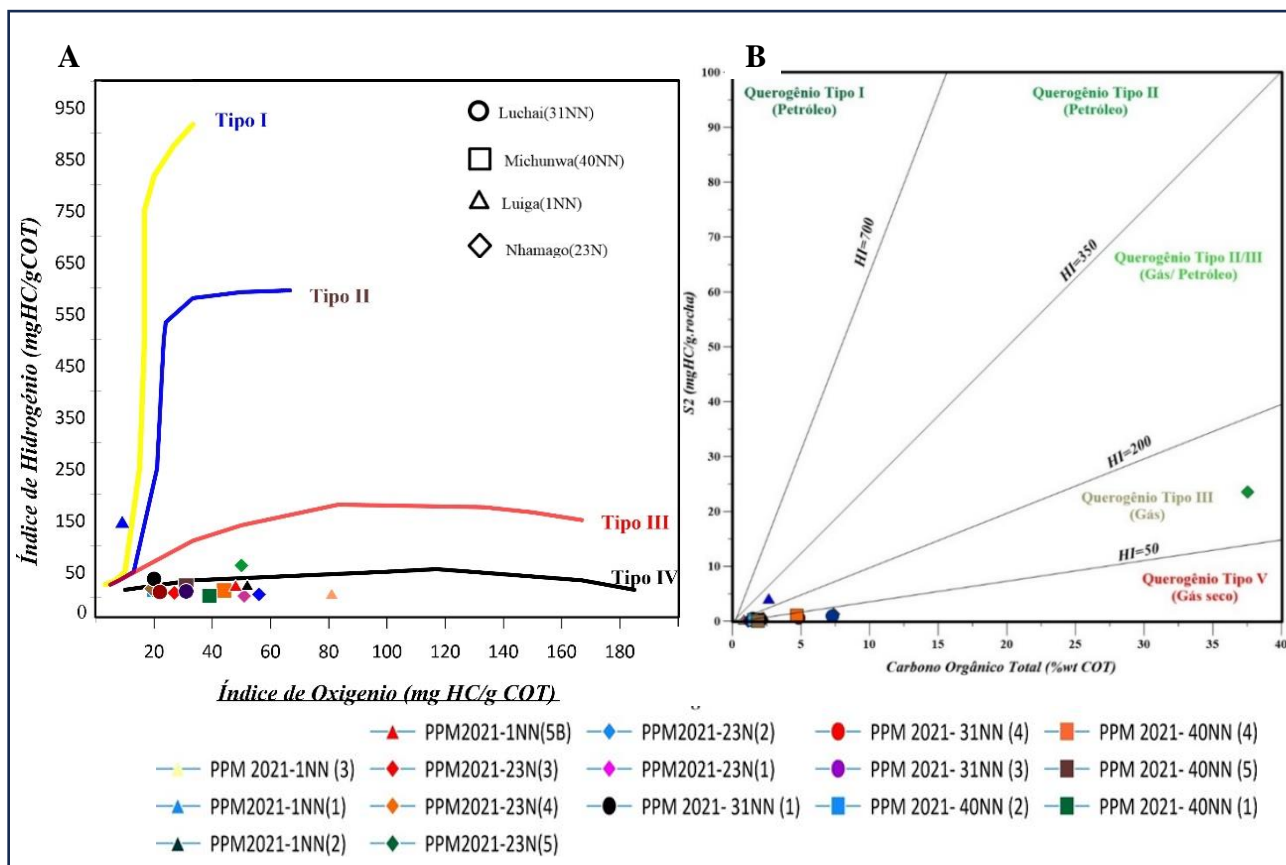


As amostras PPM2021-23NN5 (Nhamago) e PPM2021-1NN1 (Luíga) detêm um considerável potencial para geração de hidrocarbonetos sendo que a amostra PPM2021-1NN(1) encontra-se já na principal fase de geração de óleo (figura 21-B,C,D) e amostra PPM2021-23NN(5) apresenta um valor excelente de S2 e um valor excepcional de COT o que indica que poderá gerar gás a altas profundidades ou por um acréscimo de temperatura, ou seja o querogênio ainda é imaturo para a geração (figura 21-C,D).

### **5.3. Tipos de querogênio e qualidade da matéria orgânica**

Os diferentes tipos de querogênio podem gerar diferentes tipos de hidrocarbonetos, por isso há uma necessidade de analisar a qualidade desta matéria orgânica em estudo, de modo a prever o tipo de hidrocarboneto esperado em cada amostra em diferentes situações. No presente estudo foram utilizados os plotes de HI vs OI (diagrama do tipo Van Krevelen) e S2 vs COT (diagrama pseudo-Van Krevelen) para distinguir os tipos de querogênio (figura 22-A e B).

O diagrama de Van Krevelen revela uma ocorrência de três tipos de querogênio para as amostras analisadas, querogênio tipo IV, III e II. Com uma predominância do querogênio tipo III/IV e em poucas quantidades o tipo II. Estes resultados são melhores representados pelo plote S2 vs COT o qual indica ocorrência dos três tipos do querogênio, indicando de forma clara a ocorrência de querogênio tipo IV precursor de gás seco, III precursor de gás e II/III precursor de gás ou petróleo, com a predominância do tipo IV. O querogênio tipo IV corresponde a inertinite (gerador de gás seco), constituído por HI<50 que é difícil de distinguir do tipo III usando a pirólise Rock-eval (Egbobawaye, 2017).

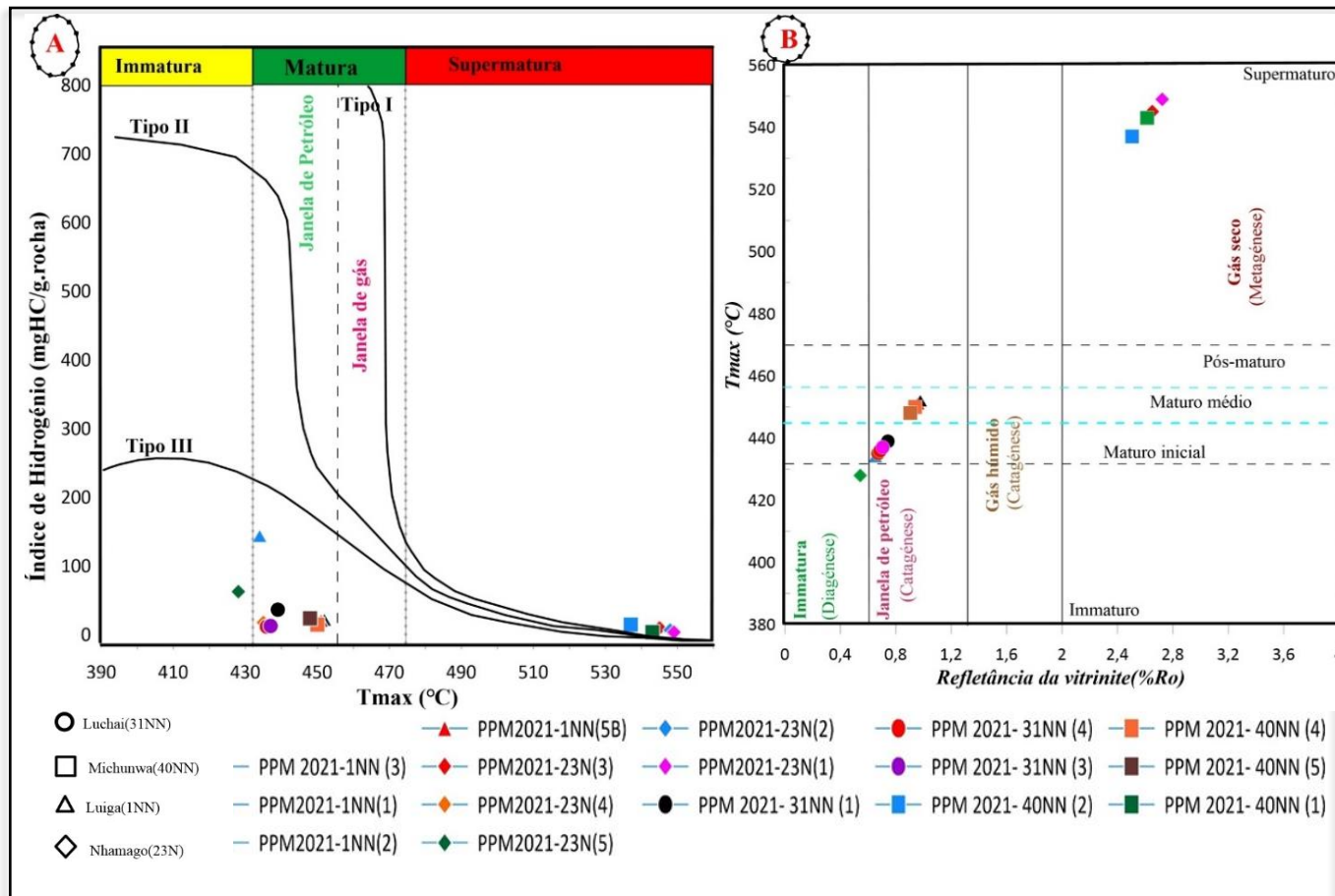


**Figura 22:** Diagrama de van Krevelen (A) e diagrama pseudo Van Krevelen (B) ilustrando os tipos de querogênio e os hidrocarbonetos a serem gerados.

Estes tipos de querogênio fazem com que as amostras analisadas caiam na zona de geração de gás (querogênio tipo III) e um pouco na zona de geração de petróleo ou gás (tipo II). O conteúdo de COT para as amostras em estudo determina um potencial para a geração de hidrocarbonetos por isso apesar dos baixos valores de HI( querogênio tipo IV) algumas amostras são interpretadas como tendo um potencial para gerar hidrocarbonetos gasosos (gás seco).

#### 5.4. Análise de maturação térmica das rochas fonte

A estimativa da maturação térmica é essencial para conhecer a qualidade da matéria orgânica da rocha fonte. As rochas supermatargas não são capazes de gerar hidrocarbonetos líquidos excepto algumas porções de gás seco Khan et al.,2021 citado por (Khan et al., 2022). A avaliação de maturação térmica das amostras em estudo foi feita a partir dos plotes de HI vs Tmax e Tmax vs Ro respectivamente (figura 23-A e B).



**Figura 23:** Plote de HI vs Tmax ilustrando os tipos e a maturação térmica do querogênio(A). Plote de Tmax vs Ro ilustrando os estágios de maturação térmica da MO e o tipo de hidrocarboneto a ser gerado (B).

Os valores de Tmax para o afloramento de Michunwa(40NN) variam de 440 a 537°C com uma média de 494,5°C . O afloramento de Nhamago (23NN) apresenta valores que variam de 428 a 549°C com uma média de 501°C, estes valores mostram que as rochas deste afloramento variam de imaturas a supermaturos. Os valores para Luchai (31NN) variam de 437 a 439°C com uma média de 437,3°C, indicando que este afloramento encontra-se na zona matura, ótima para a geração de petróleo (figura 23-B). O afloramento de Luíga (1NN) mostra uma variação de Tmax compreendida de 434 -537°C com uma média de 468,5°C estes valores indicam uma variação do matura inicial a supermatura.

Os valores muito elevados de Tmax mostram que algumas amostras representam rochas supermaturos para a geração de hidrocarbonetos líquidos mas podem agir como rochas fonte para a geração de gás seco . A possível razão para estes valores altos de maturação térmica ao longo

destas rochas é a intensa atividade tectónica observada durante o processo de subsidência da bacia. Este aquecimento impulsionou a formação de carvão ao longo da bacia.

### 5.5. Interpretação paleo-ambiental

A caracterização e investigação do paleo ambiente deposicional dos xistos carbonosos é segundo o Khan et al., 2022, apresenta uma vasta aplicação ao nível mundial, na pesquisados combustíveis fósseis. E esta caracterização ajuda a prever a variabilidade nas suas características físicas e químicas, ajudando assim a caracterizar a rocha geradora. Para o presente estudo a interpretação do paleo ambiente deposicional foi feita a partir do diagrama do diagrama modificado de Van Krevelen proposto por Khan et al 2022 (Figura 24-A) e o Digrama de Falcon (Figura 24-B). Os sedimentos estudados indicam um paleo ambiente predominantemente terrestre com prevalência de condições subóxicas a anóxicas. O excesso de amostras com valores de HI relativamente menores (<100) e OI (<50) demonstra que a matéria orgânica é derivada de fontes terrestres (Khan et al., 2022).

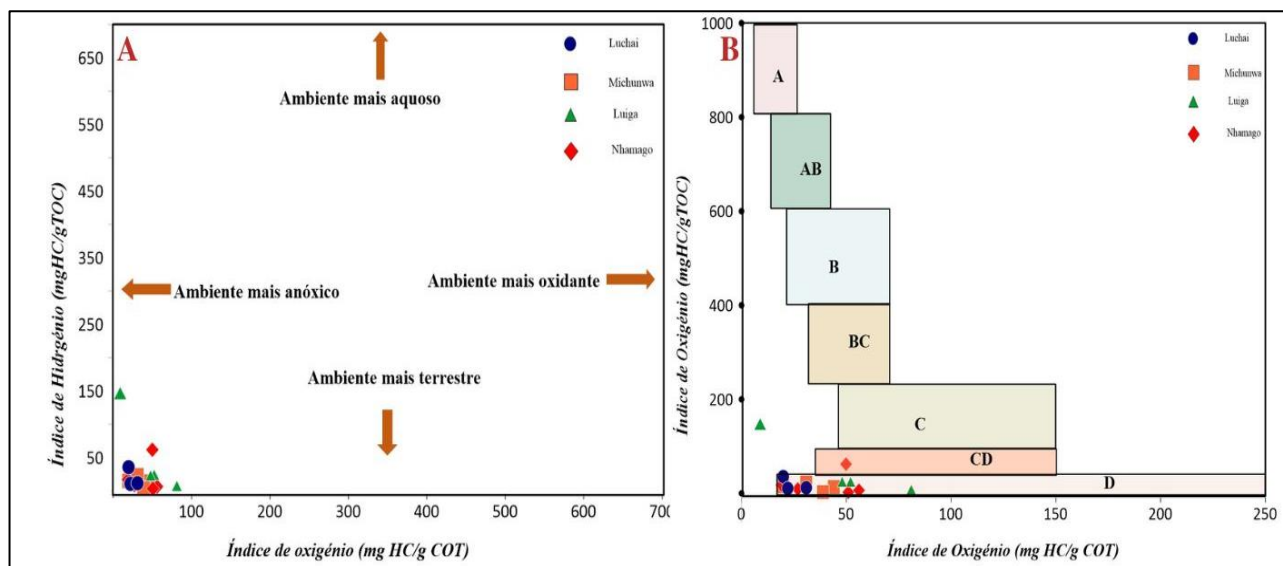


Figura 24: Análise Paleoambiental das formações estudadas.

## 5.6. Datação Palinológica

O estudo das unidades bioestratigráficas de uma dada região pode ser baseado num único táxon, numa combinação de vários taxa, na abundância relativa de diferentes *taxa* ou nas variações do conteúdo ou da distribuição de microfósseis (Coreia, 2016; Barbolini, 2013).

No presente estudo, optou-se por uma combinação de procedimentos: dar uma maior atenção à presença de *taxa* característicos de certa idade, o *taxa* que pudessem restringir determinada idade, dentro do Pérmico, à ausência de taxa de outras idades, considerando as abundâncias relativas que cada táxon apresenta (Correia, 2016). Segundo Falcon, 1975, os esporos não os mais indicados para a biozonação pois estes são oriundas de plantas pteridófitas (plantas inferiores), que são sensíveis a pequenas variações climáticas de pequena escala, não permitindo assim fazer uma relação entre a quantidade de esporos e a ocorrência de grandes eventos geológicos. Deste modo no presente estudo dá se mais relevância ao grão de pólen para a determinação das biozonas e ou associações palinológicas.

A tabela resumo das características diagnósticas para identificação e classificação das espécies encontra se na tabela de Apêndice 6.

A apresentação e discussão dos resultados dos estudos palinostratigráficos será feita para cada afloramento de forma separada.

| Afloramento de Luchai<br>F.m K4 |     | Afloramento de Michunwa<br>F.m K6 |     |     | Afloramento de Luíga<br>F.m Ksb |     |   | Litostratigrafia |   |  |
|---------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|-----|---------------------------------|-----|---|------------------|---|--|
| 7.65                            | 1.8 | 7.22                              | 6.8 | 4.4 | 12.2                            | 8.2 | 2 | Profundidade (m) |   |  |
| X                               |     |                                   |     |     |                                 |     |   |                  | Esporos                                 |  |
|                                 |     |                                   |     |     | X                               |     |   |                  |   | <i>Apiculatisporis sp</i>                |
|                                 |     |                                   |     |     | X                               |     |   |                  |   | <i>Microbaculicospora tentura</i>        |
|                                 |     |                                   |     |     | X                               |     |   |                  |   | <i>Proconospora sniposa</i>              |
|                                 |     |                                   |     | X   |                                 |     | X |                  |   | <i>Laevigatosporites collienis</i>       |
|                                 | X   |                                   |     | X   |                                 | X   |   |                  |   | <i>Laevigatosporites vulgaris</i>        |
|                                 |     |                                   |     |     |                                 | X   |   |                  |   | <i>Laevigatosporites flexus</i>          |
| X                               |     |                                   |     |     |                                 |     | X |                  |   | <i>Horriditriletes tereteangulatus</i>   |
| X                               |     |                                   |     |     |                                 | X   | X |                  |   | <i>Horriditriletes filiformis</i>        |
|                                 |     |                                   |     |     |                                 |     |   |                  |   | <i>Lophotriletes novicus</i>             |
|                                 | X   |                                   |     |     |                                 |     |   |                  |   | <i>Calamospora hurtungiana</i>           |
|                                 |     |                                   |     |     |                                 |     | X |                  |   | <i>Polypodiisporites mutabilis</i>       |
| X                               |     |                                   |     |     |                                 |     |   |                  |   | <i>Converrucosisporites micronodosus</i> |
|                                 |     |                                   |     |     |                                 |     |   |                  |   | <i>Microbacculatisporites sp</i>         |
|                                 | X   |                                   |     |     |                                 | X   |   |                  |   | <i>Calamospora sp</i>                    |
|                                 | X   |                                   | X   |     |                                 |     |   | X                |   | <i>Scheuringipollenites maximus</i>      |
|                                 | X   |                                   |     |     |                                 |     |   | X                |   | <i>Scheuringipollenites medius</i>       |
| X                               | X   |                                   |     |     |                                 |     |   | X                | <i>Scheuringipollenites ovatus</i>      |  |
|                                 |     |                                   |     |     |                                 |     |   | X                | <i>Guttulapollenites hannonicos</i>     |  |
|                                 |     |                                   |     |     |                                 |     |   |                  | <i>Staurosacites cordubensis</i>        |  |
| X                               | X   | X                                 |     |     |                                 | X   |   |                  | <i>Cycadopites glaber</i>               |  |
|                                 |     | X                                 |     |     |                                 | X   | X |                  | <i>Cycadopites cymbatus</i>             |  |
| X                               |     | X                                 |     |     |                                 |     |   |                  | <i>Cycadopites follicularis</i>         |  |
|                                 |     |                                   |     |     |                                 | X   |   |                  | <i>Vittatina subsaccata</i>             |  |
| X                               |     |                                   |     |     |                                 |     |   |                  | <i>Platysaccus leschikii</i>            |  |
| X                               |     |                                   |     |     |                                 |     |   |                  | <i>Platysaccus papilionis</i>           |  |
| X                               |     |                                   |     |     |                                 |     |   |                  | <i>Potonieisporites brasiliensis</i>    |  |
|                                 |     |                                   |     | X   |                                 | X   | X |                  | <i>Weylandites lucifer</i>              |  |
|                                 |     |                                   |     |     |                                 |     | X |                  | <i>Vittatina fasciolata</i>             |  |
| X                               |     |                                   |     |     |                                 |     |   |                  | <i>Lueckisporites virkkiae</i>          |  |
| X                               |     |                                   |     |     |                                 |     |   |                  | <i>Lunatisporites variesectus</i>       |  |
|                                 |     |                                   |     |     |                                 | X   | X |                  | <i>Protohaploxypinus goratensis</i>     |  |
|                                 |     |                                   |     |     |                                 |     |   | X                | <i>Protohaploxypinus diagonalis</i>     |  |
|                                 | X   |                                   |     |     |                                 |     |   | X                | <i>Protohaploxypinus limpidus</i>       |  |
|                                 |     |                                   |     | X   | X                               | X   |   |                  | <i>Striatopodocarpites cancellatus</i>  |  |
| X                               |     |                                   |     |     |                                 |     |   |                  | <i>Striatopodocarpites gondwanensis</i> |  |
| X                               |     |                                   |     |     |                                 |     |   |                  | <i>Striatopodocarpites fusus</i>        |  |
|                                 |     |                                   | X   |     |                                 |     |   |                  | <i>Cannanoropollis janakii</i>          |  |
|                                 |     | X                                 |     |     |                                 |     |   |                  | <i>Gnetaceapollenites sinuosus</i>      |  |
|                                 | X   |                                   |     |     |                                 |     |   |                  | <i>Baculatisporites sp</i>              |  |
| X                               |     |                                   |     |     |                                 |     | X |                  | <i>Weylandites magnus</i>               |  |
|                                 |     |                                   |     |     |                                 |     | X |                  | <i>Staurosacites cordubensis</i>        |  |

Figura 25: Distribuição dos palinomorfos por afloramento e profundidade.

### 5.6.1. Afloramento de Luchai

O afloramento de Luchai é caracterizado por apresentar uma percentagem reduzida de esporos triletes, monoletes. Este afloramento é dominado por pólenes bissacados (estriados e não estriados). As espécies identificadas para este afloramento estão representados na Figura 24, que consiste em 24 espécies distribuídos em 17 géneros, entre pólenes e esporos.

A ocorrência dos pólenes: *Lueckisporites virkkiae*, *Striatopodocarpites gondwanensis*, *S. fusus*, *Platysaccus papilionis*, permite restringir do ponto de vista estratigráfico um intervalo de idade de Kunguriano/Roadiano (pérmico inferior- médio) para este afloramento.

Em termos de biozonas, o primeiro aparecimento das espécies *Platysaccus papilionis*, *Striatopodocarpites fusus* marcam a base da biozona KK3 (Roadiano) de Modie 2007 (Pereira et al., 2014). As associações características da biozona KK2 não foram identificados neste estudo, o que sugere que as espécies identificadas representam um regime de transição entre Kunguriano e Roadiano (Lopes et al., 2014). Estes dados indicam uma idade de Roadiano para este afloramento (base do pérmico médio).

### 5.6.2. Afloramento de Luíga

O afloramento de Luíga é constituído por uma associação, caracterizada por uma abundância pólenes bissacados estriados e baixo conteúdo de esporos, datada do Lopingiano (pérmico superior), e as suas datações são baseadas na correlação com o zoneamento biostratigráfica do Karoo. Esta associação que marca a passagem do Wuchiapingiano ao Changhsingiano. A passagem é marcada pela presença de *Guttulapollenites hannonicus* na amostra “PPM 201978NNBotton2”, pela primeira vez ao longo da secção do afloramento. Segundo Falcon (1984 in Coreia., 2016), a primeira ocorrência de *Guttulapollenites hannonicus* marca a base do Changhsingiano. No entanto, (Barbolini, 2013), sugere que associação constituída por (*Protohaploxypinus limpidus*, *P. goraiensis*, *Striatopodocarpites cancellatus*, *Lueckisporites virkkiae*, *Guttulapollenites hannonicus*, *Lunatisporites noviaulensis*, *L. cf. pellucidus*, *Alisporites tenuicarpus*, cf. *Chordasporites*, *Klausipollenites schaubergeri*, cf. *Hamiapollenites*, *Falcisporites stabilis*, *F. australis*, *Weylandites lucifer*, *Calamospora* sp. ) data o Changhsingiano. Contudo, neste estudo foi identificada uma associação semelhante a supracitada constituída pelas espécies *Guttulapollenites hannonicus*, *Striatopodocarpites cancellatus*, *Protohaploxypinus limpidus*, *P.*

*goraiensis*, *Weylandites lucifer* e *Calamospora sp.* O que sugere uma idade de Changhsingiano para este afloramento.

Esta associação é ainda caracterizada pela presença do género assinalado aos *taxa* estratigraficamente relevantes como *Polypodiisporites* que caracteriza o pérmico superior de Salt Range no Paquistão (Costa, 2015). Este resultado confirma a datação dos sedimentos deste afloramento no Lopingiano.

### **5.6.3. Afloramento de Michunwa**

O afloramento de Michunwa é caracterizado por apresentar pouca preservação de grãos de pólen e esporos tendo sido identificadas apenas nove (9) espécies, distribuídas em oito (8) géneros todos característicos do pérmico. As espécies recuperadas neste afloramento apresentam uma amplitude estratigráfica muito grande, ou seja, nenhuma espécie guia foi recuperada neste afloramento, não sendo possível assim estabelecer um refinamento estratigráfico desde afloramento dentro do pérmico. As espécies identificadas estão representadas na figura 26.



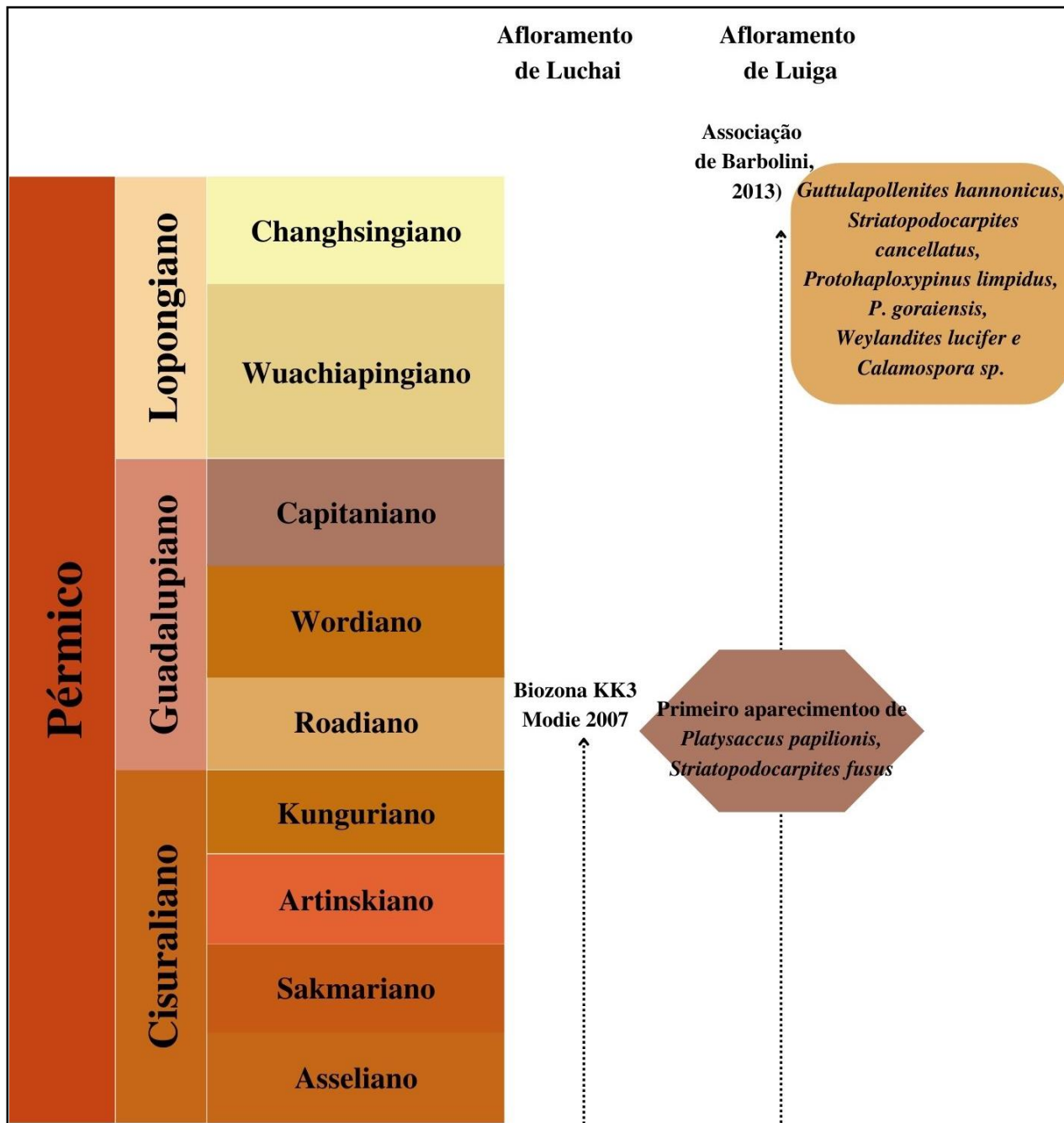


Figura 26: Distribuição cronológica dos afloramentos de acordo com o conteúdo palinológico.

### 5.7. Contribuições Geocronológicas

Os estudos feitos pelo Verniers et al 1989, permitiram uma melhor biozonação para o pérmico superior com base em 5 géneros de palinórfos. A datação relativa dos sedimentos do pérmico inferior foi complementada pela biozonação baseada em reptéis (Zona de Cistecephalus). O presente estudo, faz uma contribuição no que diz respeito a datação relativa dos sedimentos, trazendo 23 novos géneros distribuídos em 35 espécies de palinórfos. O que permitiu confirmar o posicionamento estratigráfico do afloramento de Luíga (formação KSb) para o pérmico superior (Changshisiano). Por outro lado, o presente estudo sugere uma reestruturação dos limites das idades da formação K4, pois a associação palinológica do afloramento de Luchai estabelece um posicionamento estratigráfico para a base do pérmico médio (Roadiano), ou seja, este marca o início do pérmico médio e não pérmico inferior conforme sugerido pelo Verniers et al 1989. Este facto é corroborado pelos valores de maturação térmica (Tmax) , que não são correlacionáveis com os do afloramento de Nhamago (também da formação K4), pois o afloramento de Luchai apresenta valores de maturação térmica relativamente inferiores (em média 437,5 °C), indicando um posicionamento estratigráfico para níveis relativamente mais superiores (neste caso Pérmico médio).

## 6. CONCLUSÕES

### 6.1. Conclusões

- As formações analisadas em termos quantitativos apresentam conteúdo de matéria orgânica excelente para geração de hidrocarbonetos.
- O conteúdo de carbono orgânico aumenta com o aumento da idade dos sedimentos dentro da bacia, isto é, as formações do pérmico médio e inferior apresentam maior conteúdo de carbono orgânico relativamente á formação do pérmico superior;
- Os sedimentos do pérmico médio e inferior apesar de apresentar maiores conteúdos do carbono orgânico, não apresentam uma boa qualidade para gerar hidrocarbonetos relativamente aos do pérmico superior estes que apresentam um potencial para petróleo;
- Os afloramentos que se encontram-se mais próximos á rochas metamorfizadas (Nhamago e Michunwa), encontram-se num estágio supermaturo associado á ocorrência de carvão, o que confere a estas formações um potencial para gerar gás, o que indica influência do metamorfismo sobre a maturação destes sedimentos.
- O refinamento palinostratigráfico dos afloramentos confirma os estudos feitos pelo Verniers et al., 1989 . Por outro lado traz melhorias no que concerne ao número de espécies e géneros previamente identificados e a indicação de novas idades na formação K4. Neste estudo foram recuperados um total de 41 espécies agrupadas em 26 géneros.
- A presença de espécies identificadas que datam o Roadiano, sugerem novas idades nos limites geológicos da formação K4, incluindo o afloramento de Luchai na base do pérmico médio.
- Os valores de Tmax para o afloramento de Luchai são mais baixos relativamente os valores esperados, tendo em conta o seu posicionamento estratigráfico, o que corrobora o facto deste afloramento pertencer ao pérmico médio e não pérmico inferior conforme descrito pelo Verniers et al.,1989.

## 6.2. Recomendações

- ✓ Para melhorar a percepção dos resultados sobre potencial gerador, recomendo que se faça um estudo de análise visual dos componentes do querogênio para os afloramentos em estudo (palinofácies).
- ✓ Recomenda-se que faça mais amostragem ao longo da formação K6 (pérmico medio) de modo a serem recuperados mais palinomorfos que possibilitem fazer um enquadramento estratigráfico desta formação.
- ✓ Recomenda-se que se determine uma expressão matemática fidedigna que relaciona os valores de Tmax e Refletância de vitrinite para a bacia de Metangula com base nos valores medidos.
- ✓ Recomenda-se que se faça amostragem ao longo de arenitos a confirmar possível migração de hidrocarboneto prevista neste estudo.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO, R. F. (1976). *A GEOLOGIA DE MOÇAMBIQUE*(Notícia explicativa da carta geológica de Moçambique 1:2000 000).
- Alaug, A. S., Mahmoud, S., & Deaf, A. S. (1866). *and hydrocarbon potential of some Upper*. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-0961-y>
- Balarino, M. L. (2009). *Palinoestratigrafía del Paleozoico Superior de la Cuenca Colorado, República Argentina y su correlación con áreas relacionadas*.
- BALBINOT, M. (2012). *Caracterização geoquímica de rochas geradoras do intervalo Cretáceo-Terciário da Bacia de Santos , Brasil .*
- Barbolini, N. (2013). PALYNOSTRATIGRAPHY OF THE SOUTH AFRICAN KAROO SUPERGROUP AND CORRELATIONS WITH COEVAL GONDWANAN SUCCESSIONS. *University of the Witwatersrand, Johannesburg, 79*.
- Batten, D. J. (1981). Palynofacies, organic maturation and source potential for petroleum. *Organic Maturation Studies and Fossil Fuel Exploration, January 1981, 201–223*.
- Borges, M. E. N., Fernandes, P., Rodrigues, B., & Matos, V. (2010). Maturação orgânica e palinoestratigrafia da Sondagem RUIVO-1 , região imersa da Bacia Algarvia . Contribuições para a prospecção de hidrocarbonetos Organic maturation and palynostratigraphy of the well RUIVO-1 . *GEOTIC – Sociedade Geológica de Portugal VIII Congresso Nacional de Geologia, 19(4), 1–4*.
- Castro, L. N. de S. (2006). Dinoflagelados e outros palinómorfs do Miocénico do sector distal da Bacia do Baixo-Tejo. *Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Univ. Nova de Lisboa, 380 P., 384*.
- Correia, J. C. P. F. M. (2016). Palinologia , Palinofácies e Maturação Orgânica dos Sedimentos da Bacia de Moatize – Minjova , Karoo Inferior , Moçambique. *Univerisade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Tese de Mestrado de Engenharia Geológica, 161*. <http://hdl.handle.net/10362/21602>
- Costa, M. S. P. L. (2015). Palinoestratigrafia e maturação orgânica do Karoo da Bacia de Moatize-Minjova , Moçambique. *Geonoovas, 29(January), 71–80*.
- Deaf, A. S. (2009). *Palynology, palynofacies and hydrocarbon potential of the Cretaceous rocks of northern Egypt*. <http://eprints.soton.ac.uk/168943/>
- Egbobawaye, E. I. (2017). Petroleum Source-Rock Evaluation and Hydrocarbon Potential in Montney Formation Unconventional Reservoir, Northeastern British Columbia, Canada. *Natural Resources, 08(11), 716–756*. <https://doi.org/10.4236/nr.2017.811045>
- Falcon, R. M. S. (1975). Palynostratigraphy of the Karoo sequence in the central Sebungwe District, Mid zambesi Basin, Rhodesia. *Palaeontographica Africana, 18, 1–29*.
- Fernandes, P. M. C. (2000). *Investigation of the Stratigrphy, Maturation and Source-rock Potential of Carboniferous Black Shales in the Dublin Basin*.

- Forsman, J. P., & Hunt, J. M. (1958). *Insoluble Organic Matter (Kerogen) in Sedimentary Rocks of Marine*. 541.
- Glikson, M. (2020). *Coal — A Window to Past Climate and Vegetation*.
- Jarvie, D. M., Claxton, B. L., Henk, F., & Breyer, J. T. (2001). Oil and Shale Gas from the Barnett Shale, Ft. Worth Basin, Texas. *AAPG Bulletin*, 85, 1–28. <https://doi.org/10.1306/8626e28d-173b-11d7-8645000102c1865d>
- Jon, G., & Richard, S. (2004). *PETROLEUM GEOSCIENCE*.
- Khan, N., Jan, I. U., Iqbal, S., Swennen, R., Hersi, O. S., & Hussain, H. S. (2021). Bulk organic geochemical and palynofacies analyses of the Hettangian Datta Formation (Potwar Basin, Pakistan): Regional comparison with the time equivalent Lathi Formation (Jaisalmer Basin, India). *Journal of Earth System Science*, 130(3). <https://doi.org/10.1007/s12040-021-01649-4>
- Khan, N., Ullah, W., Siyar, S. M., Wadood, B., Ayyub, T., & Ullah, T. (2022). Hydrocarbon source rock assessment of the shale and coal bearing horizons of the Early Paleocene Hangu Formation in Kala-Chitta Range, Northwest Pakistan. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 12(8), 2155–2172. <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01433-6>
- Lächelt, S. (2004). Geology and mineral resources of Africa. In *Nature* (Vol. 162, Issue 4129). <https://doi.org/10.1038/162971a0>
- Lopes, G., Pereira, Z., Fernandes, P., & Marques, J. (2014). Datação palinológica dos sedimentos glaciogénicos da Formação Tilítica de Vúzi, sondagem ETA 65, Bacia Carbonífera de Moatize-Minjova, Moçambique: Resultados preliminares. *Comunicacoes Geologicas*, 101(May 2015), 481–484.
- Machavate, J. (2020). O papel de depósitos sedimentares Permo-Triássicos do Karoo nos sistemas de petróleo da Bacia do Rovuma Estudo de caso: Sub-Bacia de N'Condézi. *Dissertação de Mestrado Em Gestão de Recursos Minerais*.
- Mendonça Filho, J. G., Rgo, T., Oliveira Mendonça, J. de, de Oliveira, A. D., da Silva, T. F., Franco, N., & da Silva, F. S. (2012). Organic Facies: Palynofacies and Organic Geochemistry Approaches. *Geochemistry - Earth's System Processes*. <https://doi.org/10.5772/47928>
- Ministério da Administração estatal. (2005). *Ministério da Administração Estatal PERFIL DO DISTRITO DE LAGO PROVÍNCIA DE NISSA Edição 2005*. 1–54.
- Olivier, N., & Atud, T. (2017). Spores and Pollen Colour Changes and Thermal Maturation of Mid-Cretaceous Lacustrine Organic-rich Sediments in the Mamfe Basin, S.W. Cameroon. *Journal of Geography and Geology*, 10(1), 22. <https://doi.org/10.5539/jgg.v10n1p22>
- Paulino, F. P., Vasconcelos, L., & Marques, J. (2009). Estratigrafia do Karoo em Moçambique. Novas Unidades. *X Congresso de Geoquímica Dos Países de Língua Portuguesa, October 2016*.
- Pereira, Z., Lopes, G., Lopes, G., Fernandes, P., & Marques, J. (2014). Palynostratigraphical

- study of the eta 72 borehole from the lower karoo rocks in the moatize-minjova coal basin, mozambique: Preliminary results | Estudo palinostratigráfico da sondagem ETA 72 do Karoo Inferior da Bacia Carbonífera de Moatize-Minjova, Moç. *Comunicacoes Geologicas*, 101(May 2015).
- Spigolon, A. L. . (2003). *Aptiano Da Bacia Potiguar , Brasil ) : Paleoambiente E Maturação Formação Alagamar ( Aptiano Da Bacia Potiguar ,. March*.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1432.2320>
- Tissot, B. ., & Welt, D. . (1984). Petroleum Formation and Occurrence. In *Eos, Transactions American Geophysical Union* (Vol. 66, Issue 37). <https://doi.org/10.1029/eo066i037p00643>
- Traverse, A. (2007). Paleopalynology. *Landman, N.H., Jones, D.S. (Eds.), Topics in Geobiology Series, American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation, Springer, Dordrecht*, 814.
- Tyson, R. V. (1987). The genesis and palynofacies characteristics of marine petroleum source rocks. *Marine Petroleum Source Rocks*, 26, 47–67.
- Verniers, J., Jourdan, P. P., Paulis, R. V., Frasca-Spada, L., & De Bock, F. R. (1989). The Karoo Graben of Metangula Northern Mozambique. *Journal of African Earth Sciences*, 9(1), 137–158. [https://doi.org/10.1016/0899-5362\(89\)90016-X](https://doi.org/10.1016/0899-5362(89)90016-X)
- Wust, R. A. J., Hackley, P. C., Nassichuk, B. R., Willment, N., & Brezovski, R. (2013). Vitrinite reflectance versus pyrolysis Tmax data: Assessing thermal maturity in shale plays with special reference to the Duvernay shale play of the Western Canadian Sedimentary Basin, Alberta, Canada. *Society of Petroleum Engineers - Asia Pacific Unconventional Resources Conference and Exhibition 2013: Delivering Abundant Energy for a Sustainable Future*, 1(November 2013), 347–357. <https://doi.org/10.2118/167031-ms>
- Ybert, J., Carvalho, M., & Scheel-ybert, R. (2012). *Jean-Pierre Ybert , Marcelo de Araujo Carvalho , Rita Scheel-Ybert Museu Nacional - Série Livros 47. January*.
- Zago, L. M. (2015). *Caracterização Palinofaciológica de Sedimentos devonianos das Ilhas Falkland*.

## APÊNDICES

**Apêndice 1:** Tabela dos resultados da geoquímica orgânica e valores calculados de Refletância da Vitrinite;

**Apêndice 2:** *Logs* geoquímico e delimitação de horizontes geradores do afloramento de Nhamago .

**Apêndice 3:** *Logs* geoquímico e delimitação de horizontes geradores do afloramento de Luíga.

**Apêndice 4:** *Logs* geoquímico e delimitação de horizontes geradores do afloramento de Luchai.

**Apêndice 5:** *Logs* geoquímico e delimitação de horizontes geradores do afloramento de Michunwa.

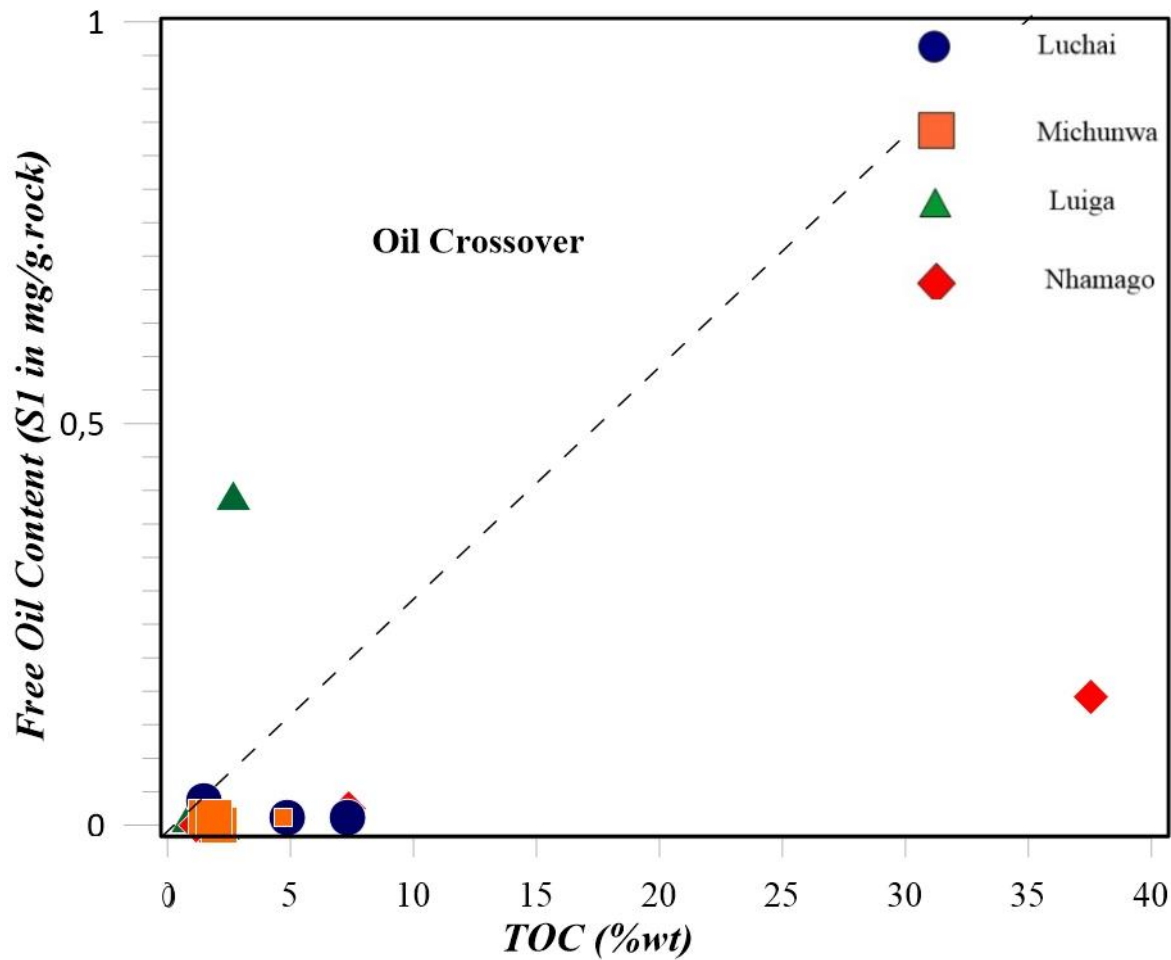
**Apêndice 6:** Tabela de características morfológicas dos polens e esporos identificados .



**Datação Relativa e Potencial Gerador de Hidrocarbonetos em Afloramentos Pérmicos do Graben de Metangula.**

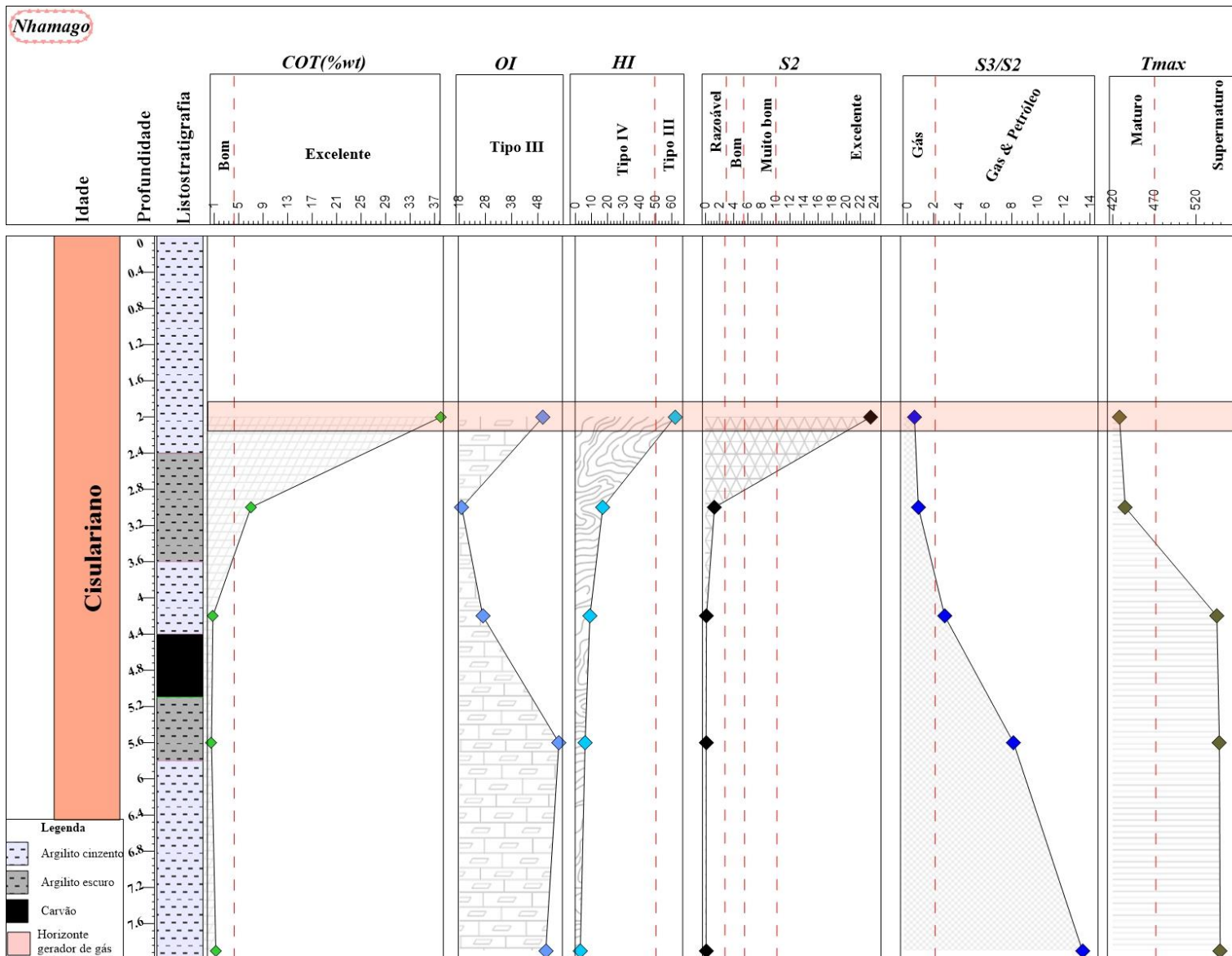
**Apêndice 1:** Tabela resumo de resultados de análise de geoquímica orgânica para as amostras analisadas.

| Afloramento | Formação | Amostra           | S1   | S2   | S3    | PI     | S3/S2 | GP    | Tmax | TOC   | HI  | OI | Ro calculado |
|-------------|----------|-------------------|------|------|-------|--------|-------|-------|------|-------|-----|----|--------------|
| Michunwa    | K6       | PPM 2021-40NN (1) | 0,01 | 0,25 | 0.33  | 0.068  | 1.32  | 0.26  | 537  | 1.60  | 15  | 20 | 2,506        |
|             |          | PPM 2021-40NN (2) | 0    | 0,3  | 0.93  | 0.031  | 3.1   | 0.3   | 450  | 2.10  | 14  | 44 | 0,94         |
|             |          | PPM2021-40NN(3)   | 0,01 | 1,11 | 1.47  | 0.013  | 1.32  | 1.12  | 448  | 4.70  | 23  | 31 | 0,904        |
|             |          | PPM 2021 40NN(5)  | 0,01 | 0,06 | 0.75  | 0.295  | 12.5  | 0.061 | 543  | 1.88  | 3   | 39 | 2,614        |
| Nhamago     | K4       | PPM 2021-23NN(3)  | 0    | 0,12 | 0.37  | 0.0056 | 3.08  | 0.12  | 545  | 1.34  | 9   | 27 | 2,65         |
|             |          | PPM2021-23NN(4)   | 0,02 | 1,27 | 1.40  | 0.015  | 1.10  | 1.29  | 435  | 7.37  | 17  | 19 | 0,67         |
|             |          | PPM2021-23NN(5)   | 0,16 | 23,5 | 19.07 | 0.007  | 0.81  | 23.66 | 428  | 37.56 | 62  | 50 | 0,544        |
|             |          | PPM2021-23NN(2)   | 0    | 0,08 | 0.66  | 0.125  | 8.25  | 0.08  | 548  | 1.16  | 6   | 56 | 2,704        |
|             |          | PPM2021-23NN(1)   | 0,01 | 0,07 | 0.94  | 0.228  | 13.42 | 0.08  | 549  | 1.82  | 3   | 51 | 2,722        |
| Luchai      | K4       | PPM 202-31NN (1)  | 0,03 | 0,54 | 0.31  | 0.067  | 0.57  | 0.57  | 439  | 1.49  | 36  | 20 | 0,742        |
|             |          | PPM2021-31NN(3)   | 0,01 | 0,57 | 1.10  | 0.023  | 1.92  | 0.58  | 436  | 4.84  | 11  | 22 | 0,688        |
|             |          | PPM2021-31NN(4)   | 0,02 | 0,95 | 2.27  | 0.032  | 2.38  | 0.97  | 437  | 7.30  | 12  | 31 | 0,706        |
| Luíga       | Ksb      | PPM 2021-1NN (3)  | 0    | 0,04 | 0.7   | 0.270  | 17.5  | 0.04  | 537  | 0.87  | 4   | 81 | 2,506        |
|             |          | PPM2021-1NN(1)    | 0,41 | 3,83 | 0.24  | 0.107  | 0.06  | 4.24  | 434  | 2.67  | 143 | 9  | 0,652        |
|             |          | PPM2021-1NN(2)    | 0,01 | 0,47 | 1.16  | 0.036  | 2.46  | 0.48  | 452  | 2.21  | 21  | 52 | 0,976        |
|             |          | PPM2021-1NN(5B)   | 0    | 0,47 | 1.10  | 0.018  | 2.34  | 0.47  | 451  | 2.27  | 20  | 48 | 0,958        |

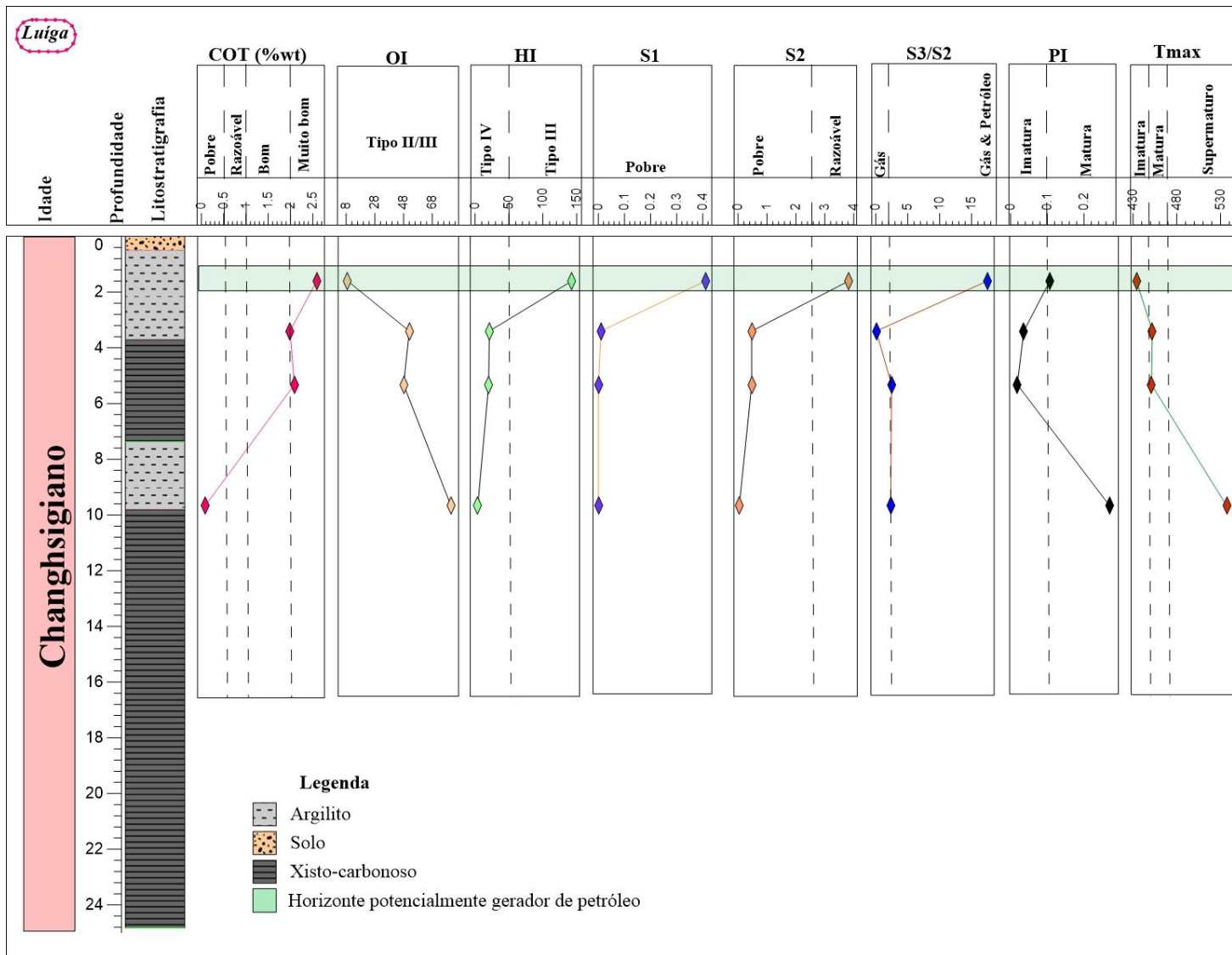


Apêndice 2: Diagrama de oil crossover mostrando um potencial de geração de petróleo para o afloramento de Luíga .

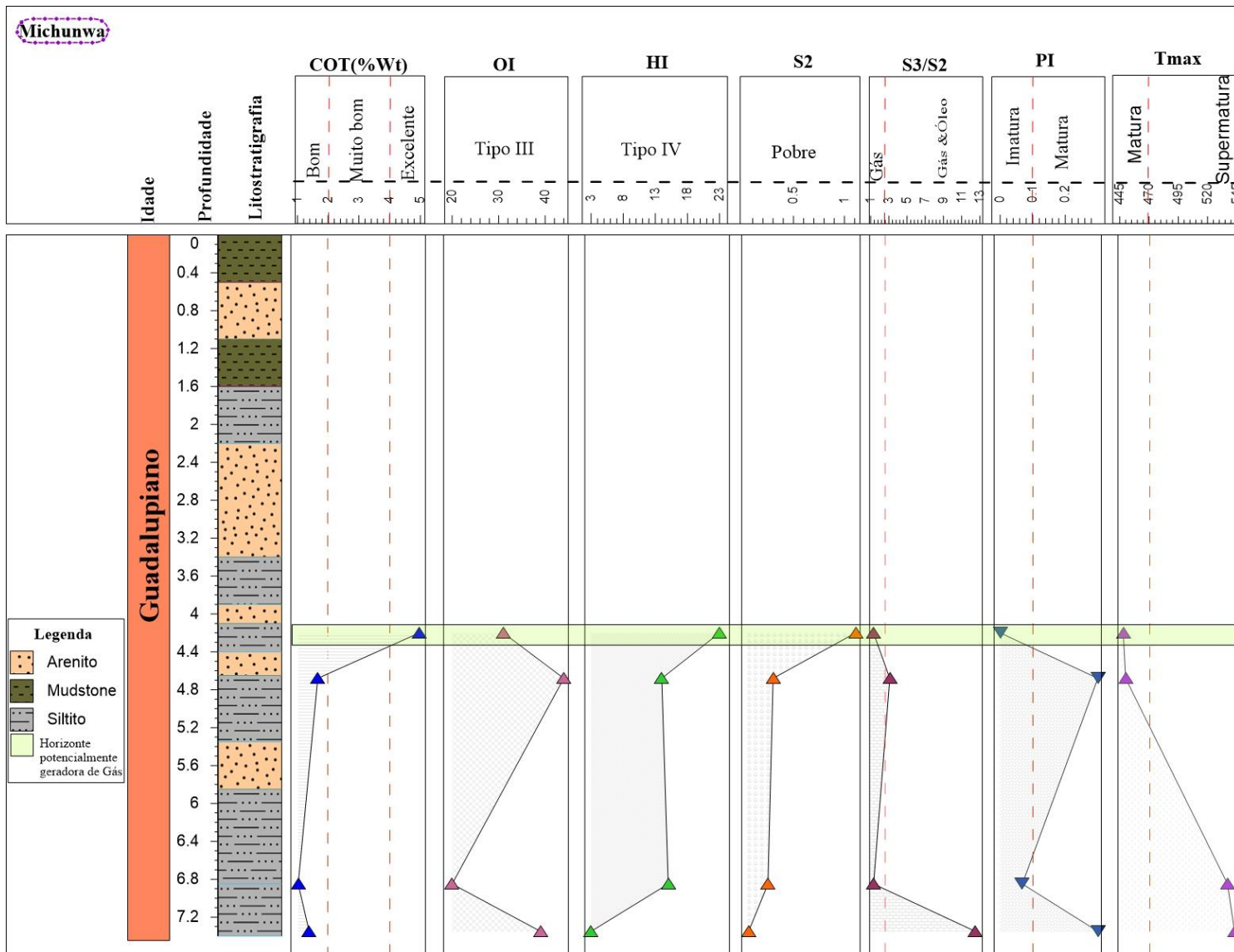
Apêndice 3: Log geoquímico de afloramentos de Nhamago .



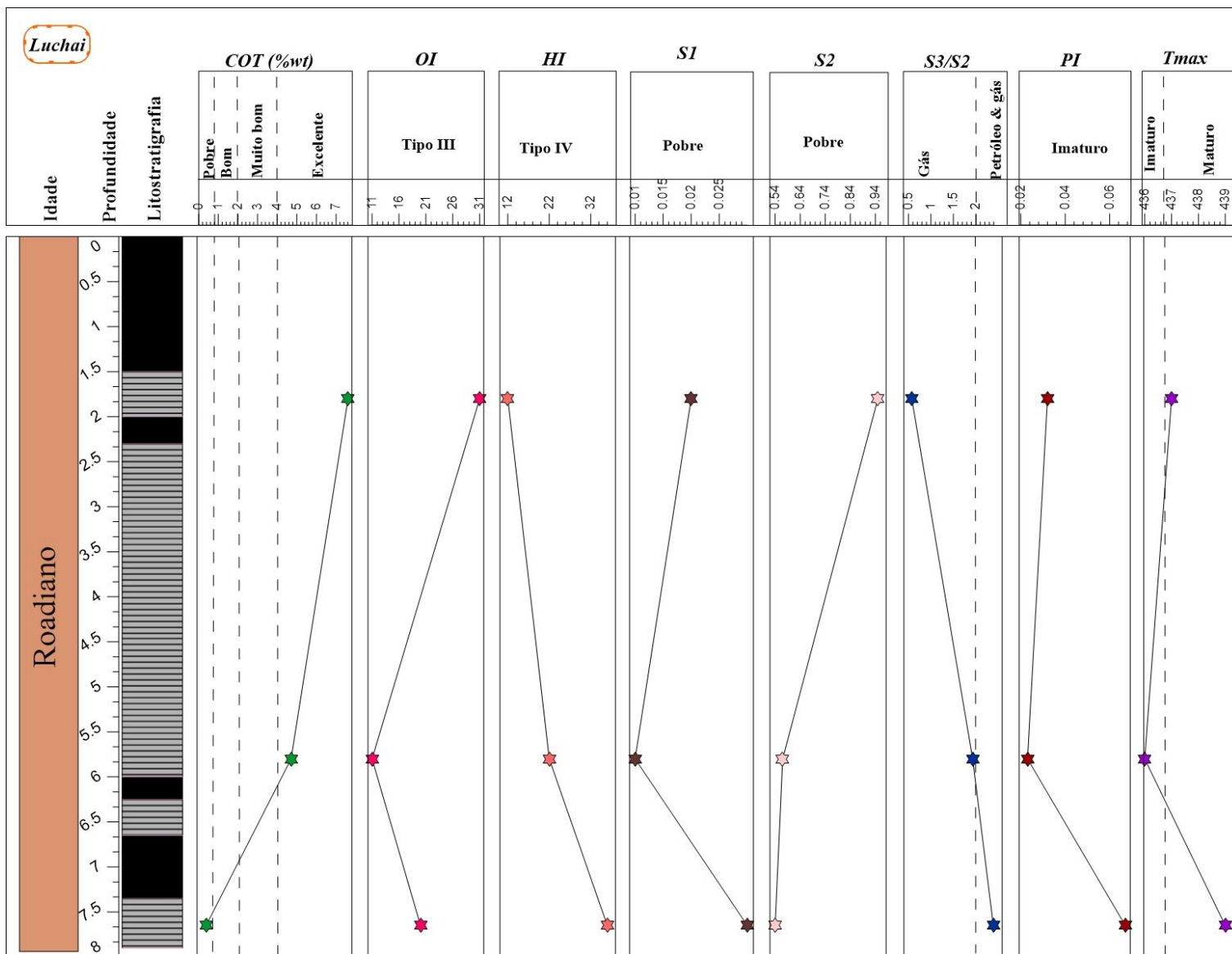
Apêndice 4: Log geoquímico de afloramentos de Luíga



Apêndice 5: Log geoquímico de afloramentos de Michunwa

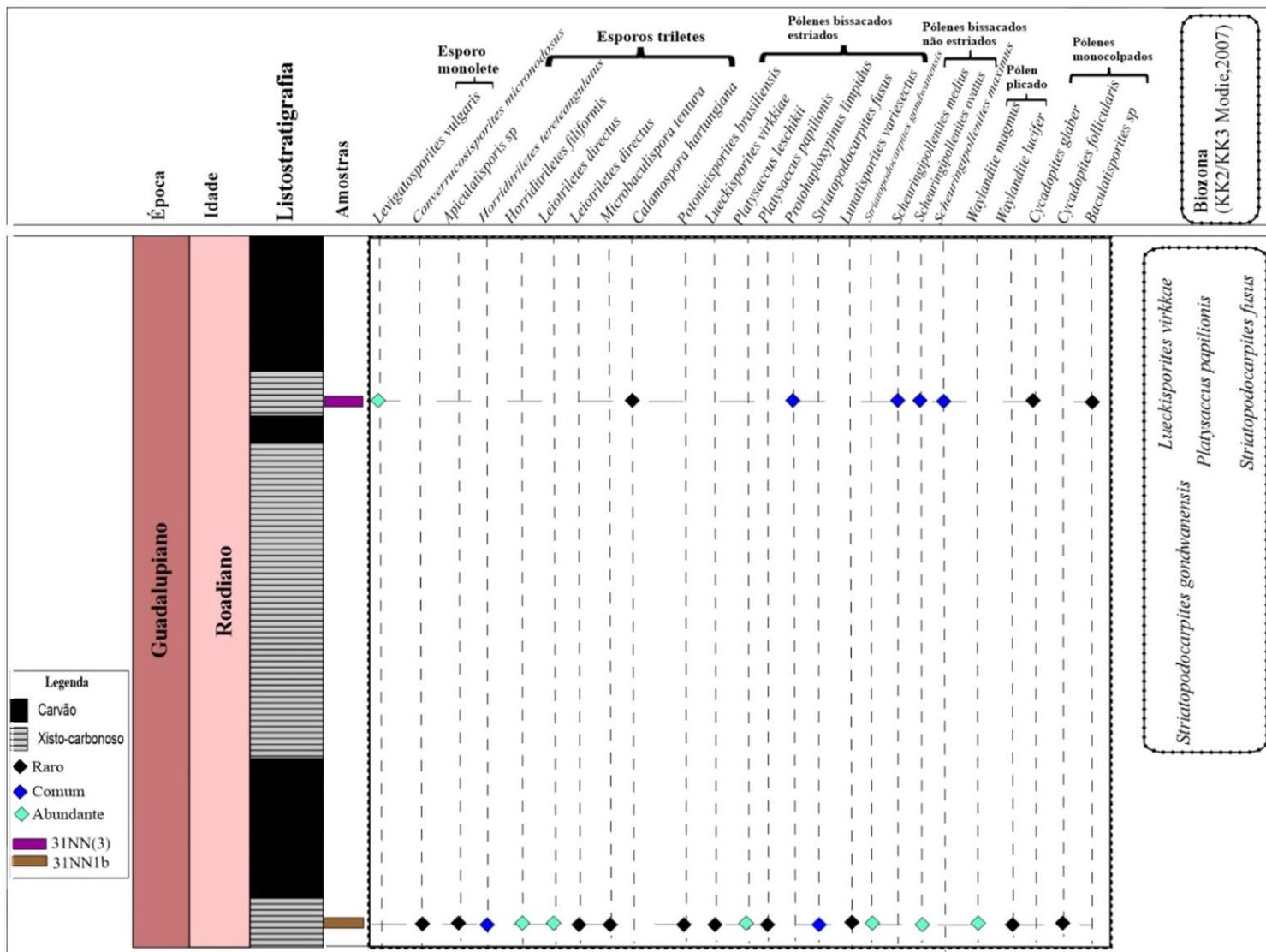


Apêndice 6: Log geoquímico de afloramentos de Luchai



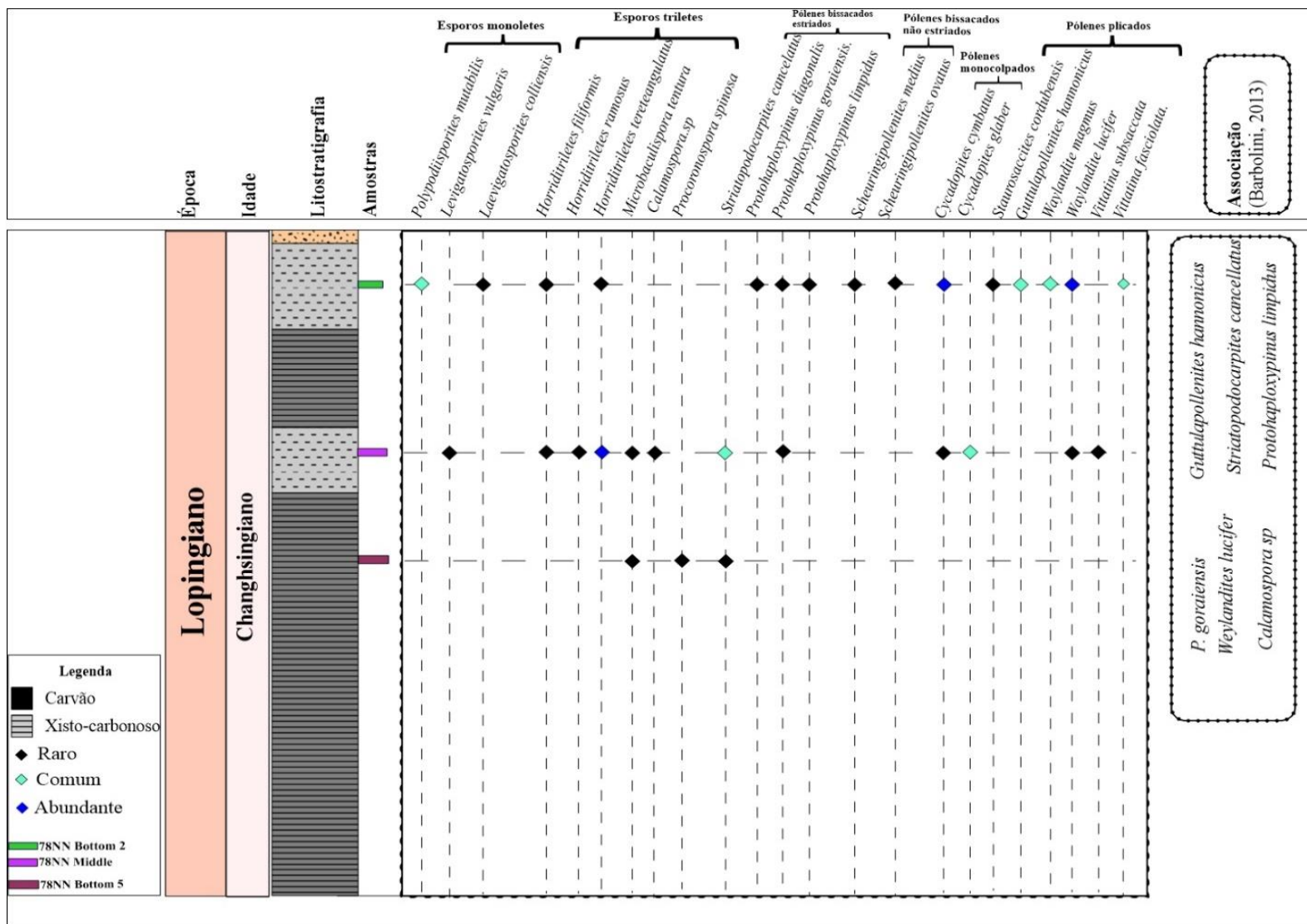
## Datação Relativa e Potencial Gerador de Hidrocarbonetos em Afloramentos Pérmicos do Graben de Metangula.

**Apêndice 7:** Espécies de pólenes e esporos recuperadas do afloramento de Luchai e interpretação palinostratigráfica, o símbolo representa a ocorrência de cada espécie.



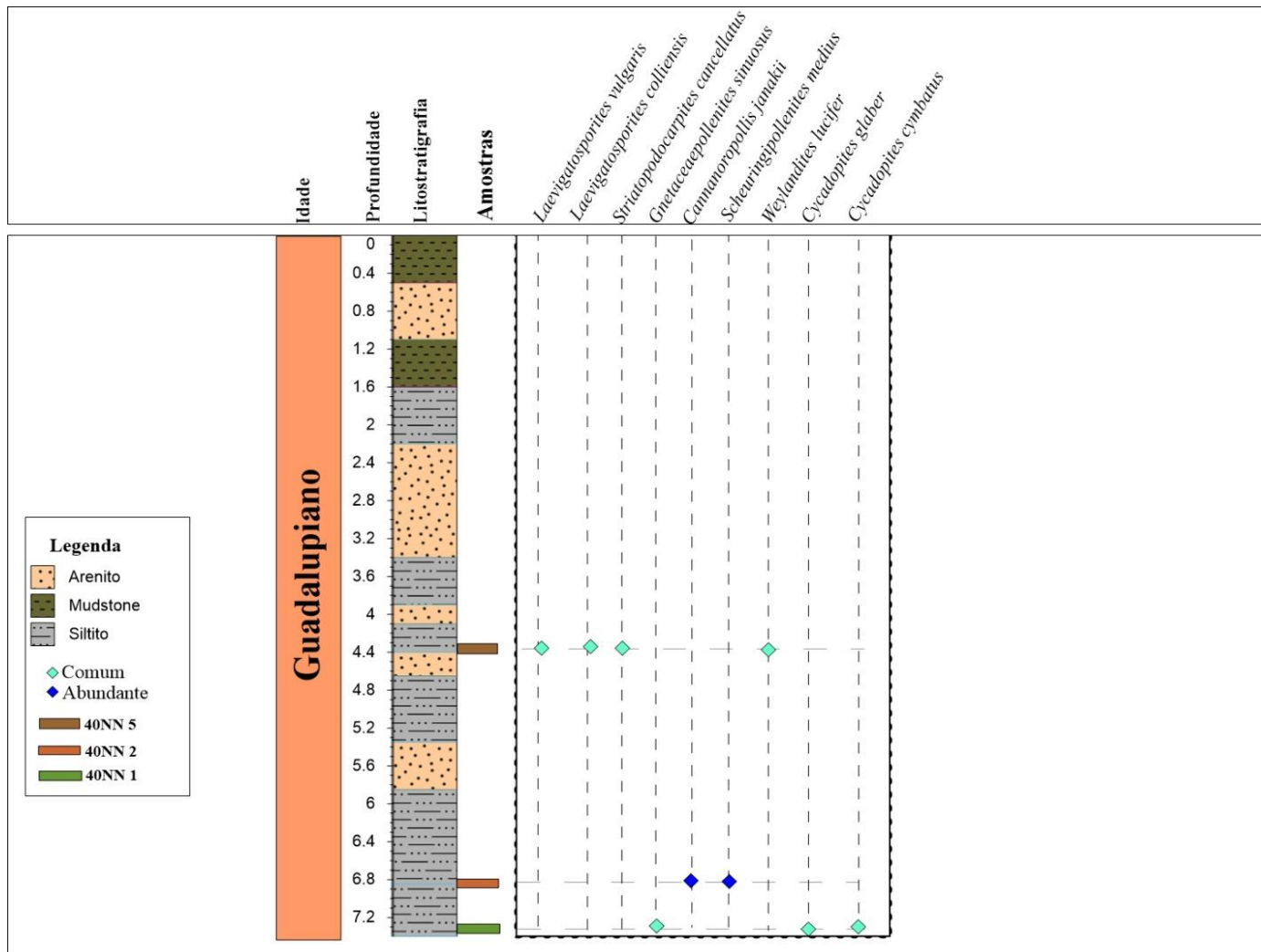
## Datação Relativa e Potencial Gerador de Hidrocarbonetos em Afloramentos Pérmicos do Graben de Metangula.

**Apêndice 8:** Espécies de pólenes e esporos recuperadas do afloramento de Luiga e interpretação palinostratigráfica, o símbolo representa a ocorrência de cada espécie.





Datação Relativa e Potencial Gerador de Hidrocarbonetos em Afloramentos Pérmicos do Graben de Metangula.



**Apêndice 8:** Espécies de pólenes e esporos recuperadas do afloramento de Michunwa e interpretação palinostratigráfica, o símbolo representa ocorrência de cada espécie.

Apêndice 7: Tabela de espécies identificadas e suas características diagnósticas.

| Espécies   | Características diagnósticas   |
|--|--|
| <i>Laevigatosporites colliensis</i> (Balme and Hennelly 1956)          | Esporo monolete de Contorno suave, oval a subcircular, Com uma Leasura que se estende por todo comprimento do esporo frequentemente constituído por algumas dobras.  |
| <i>Laevigatosporites vulgaris</i> (Ibrahim) Alpern & Doubinger, 1973   | Contorno equatorial elipsoidal, abertura reta ou curvada Exina fina (2-3 µm) e lisa. sem lábios  |
| <i>Laevigatosporites flexus</i> (Segroves 1970)                        | Contorno longitudinalmente oval a subcircular, Leasura simples, Exina levigada. com delicados lábios   |
| <i>Horriditriletes tereteangulatus</i> (Balme and Hennelly)            | Esporo radial trilete, Contorno triangular com vértices redondos, lados retos a côncavos. o raio do trilete estende-se à periferia do esporo, às vezes pouco visível, Costelas/espinhas irregulares dispostas.   |
| <i>Horriditriletes filiformis</i> (Balme y Hennelly)                   | Espora radial trilete, contorno triangular, com lados rectos ligeiramente convexos, Lesão discernível e simples, com raios retos que estender até 2/3 do raio do esporo, parcialmente coberto por ornamentação composta predominantemente por báculos e, em menor grau, por espinhos homoganeamente dispostos. |
| <i>Lophotriletes novicus</i> Singh, 1964,                              | Esporo radial trilete, com lados rectos a levemente côncavos. Lesão simples, com raios retos. Ornamentação composta por cones e grãos, com ápice arredondado, agudo ou truncado. Exina 1 µm de espessura (Balarino, 2009)  |
| <i>Calamospora hurtungiana</i> Schopf en Schopf, Wilson y Bentall 1944 | Esporo radial trilete, de contorno circular a subcircular, deformado por compressão Margem suave. Lesão simples, com raios retos, dificilmente discerníveis. Exina levigada, fina, com numerosas dobras concêntricas irregulares, produtos de compressão   |
| <i>Polypodiisporites mutabilis</i> , Balme, 1970                       | Esporo monolete. Presentes assimétricas marca monolete. Desenvolve-se na exina uma regulação muito grosseira (com mais verrugas entrelaçadas) para um padrão de regulação mais abrangente (com retículo negativo bem definido) (Di Pasquo & Grader, 2012).   |
| <i>Converrucosisporites micronodosus</i> (Balme y Hennelly)            | Esporo radial trilete, de contorno subtriangular, de lados rectos a levemente convexos e ápices redondeados. Leasura simples, de raios retos, levemente sinuosos. Ornamentação conformada por verrugas dispostas homoganeamente. Os espaços entre as verrugas são levigados e mais claro (Balarino, 2009).     |

**Datação Relativa e Potencial Gerador de Hidrocarbonetos em Afloramentos Pérmicos do Graben de Metangula.**

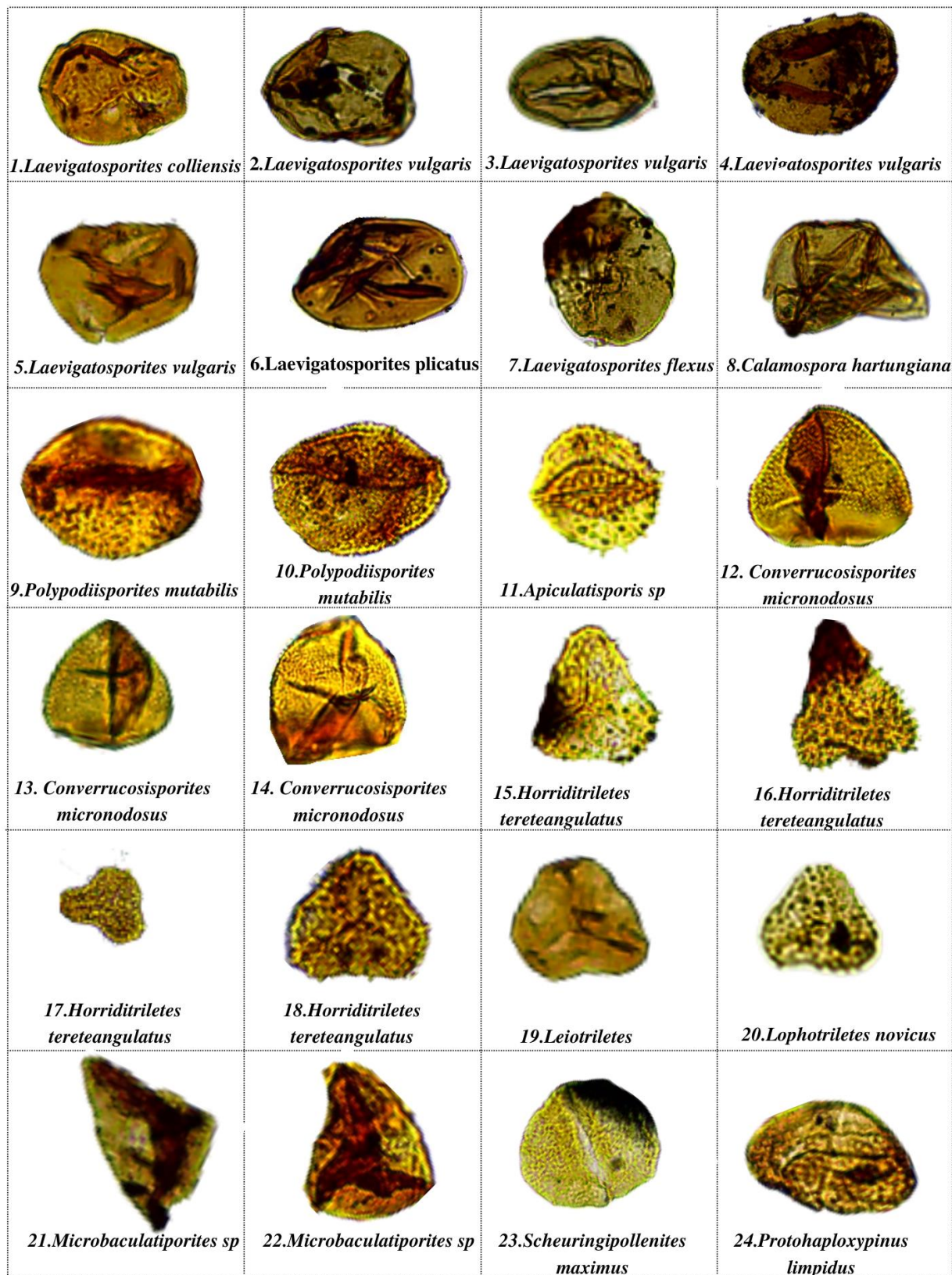
|   |   |
|---|---|
| <i>Scheuringipollenites maximus</i> (Hart) Tiwari 1973            | Grão de pólen bissacado, haploxilonóide, de contorno circular a oval alongado no sentido transversal. Corpo central de parede delgada, de coloração mais clara a dos sacos. As bordas, quando discerníveis, delimitam um corpo central circular a levemente oval alongado transversalmente. Sexina dos sacos infrareticulada, de muros grossos geralmente dispostos radialmente (Balarino, 2009). |
| <i>Scheuringipollenites medius</i> (Burjack) Dias-Fabício 1981    | Grão de pólen bissacado haploxilonóide, de contorno subcircular a levemente oval, alongado transversalmente. Corpo central de margens no discerníveis. Sacos iguais o levemente menores Sexina de los sacos infrareticulada, de muros delgados.   |
| <i>Scheuringipollenites ovatus</i> (Balme y Hennelly) Foster 1975 | Grão de pólen bissacado, haploxilonóide, de contorno general subcircular a levemente oval, alongado no sentido longitudinal. Corpo central oval longitudinal, de parede delgada de coloração mis clara que a dos sacos e bordas geralmente pouco discerníveis.. Sacos iguais o levemente menores a medio  |
| <i>Guttulapollenites hannonicos</i> Goubin, 1965                  | Grão de pólen, assacado com contorno geralmente circular, constitui um corpo esférico com a exina constituído por dois “balões “individualizados no polo distal.  |
| <i>Staurosaccites cordubensis</i> Archangelsky y Gambero 1979     | Grão de pólen bissacado, haploxilonóide, de contorno geralmente circular a levemente oval. Corpo central circular, claro, de parede fina separadas por uma estria central transversal. Nas ténias podem observar se, uma difusa ornamentação de verrugas de secção poligonal a irregular.   |
| <i>Cycadopites glaber</i> (Balme and Hennelly) Segroves 1970      | Pólen monocolpado, de âmbito oval a fusiforme, o colpo se estende por todo o comprimento do pólen, em espécimes não expandidas é bordejado por dobras nos dois lados do colpo. Este autor sugere que Entylissa e cycadopites são sinónimos(Glikson, 2020).  |
| <i>Cycadopites cymbatus</i> (Balme and Hennelly) Segroves 1970    | Monocolpado. Contorno elíptico. O sulco pode ser fechado ou aberto, mas em espécimes perfeitamente conservados é provavelmente sempre fechado. É ligeiramente mais largo lateralmente do que centralmente. As margens laterais são parabólicas, ou seja, levemente desenhadas para fora.  |
| <i>Cycadopites follicularis</i> Wilson y Webster 1946             | Grão de pólen monocolpado, de contorno geral oval a afilado, com lados convexos, extremidades pontiagudas. Colpo estendido e ao longo de todo o corpo, de largura variável, geralmente estreito no centro e extremidades abertas. Exina levigada, geralmente corroída   |
| <i>Vittatina subsaccata</i> Samoilovich 1953                      | Grão de pólen teniado, de contorno geral oval. Face proximal dividida por finas estrias em 8 a mais de 15 ténias, orientadas transversalmente e estendidas ate as margens do corpo. As ténias são completas e não se bifurcam.  |
| <i>Platysaccus leschikii</i> Hart 1960                            | Grão de pólen bissacado, fortemente diploxilonóide. Corpo central pouco discernível, de contorno oval a subromboidal, alongado longitudinalmente. Capa de lados paralelos a côncavos, convergindo nos extremos do corpo. Sexina dos sacos infrareticulada, conformando muros delgados dispostos de maneira comprimida.  |
| <i>Platysaccus papilionis</i> Potonié y Klaus 1954                | Pólen bissacado, fortemente diploxilonóide. Corpo central circular de parede lisa. Sacos inclinados distalmente. Sexina dos sacos infrareticulada, com muros delgados .   |
| <i>Potonieisporites brasiliensis</i> (Nahuys, Alpern e Ybert)     | Grão de pólen monossacado de simetria bilateral, contorno oval a subretangular, corpo central subcircular marca dilete a monolete. Apresenta uma dobra continua e periférico de espessura variável transversais ao corpo central. Sexina do saco infrareticulada, conformada por murros irregulares.  |

**Datação Relativa e Potencial Gerador de Hidrocarbonetos em Afloramentos Pérmicos do Graben de Metangula.**

|  |  |
|--|--|
| <i>Weylandites lucifer</i><br>(Bharadwaj y Salujha) Foster 1975        | Grão de pólen teniado, de contorno oval alongando transversalmente, corpo dividido por estrias finas em ténias estreitas que continuam ao longo do grão mais de 17 ténias dispostos transversalmente, de largura variável. Na face distal, apresenta estrias longitudinais.  |
| <i>Vittatina fasciolata</i> (Balme y Hennelly) Bharadwaj 1962          | Grão de pólen assacado com contorno geral subcircular a circular, com 10 a 15 ténias proximais estendendo-se transversalmente ao corpo. As ténias são completas atingindo as bordas do corpo sem afinar. Perto das extremidades das ténias, duas dobras verticais. Nas laterais da face oposta, poucas ténias são observadas perpendiculares aos anteriores.   |
| <i>Lueckisporites virkkiae</i><br>Potonie and Klaus 1954               | Grão de pólen bissacado, diploxilonóide, elipsoidal longitudinalmente. Corpo central circular. Face proximal dividida ao meio por duas ténias circulares, com uma pequena área livre entre si. Sacos semicirculares, maiores que o corpo central.  |
| <i>Lunatisporites variesectus</i><br>Archangelsky y Gamero 1979        | Grão de pólen bissacado, teniado, de contorno oval alongado transversalmente, haploxilonóide a levemente diploxilonóide. Corpo central circular a suboval, alongado no sentido equatorial. Parede do corpo delgada que lhe dá uma coloração clara, hialina. Capa com uma estria principal que bissecta o corpo transversalmente, completa. Pode observar-se em alguns casos a presença de uma marca de monolete curta. |
| <i>Protohaploxypinus goraiensis</i> (Potonie and Lele 1961; Hart 1964) | Pólen bissacado Diploxilonóide, Sacos sempre levemente menores que o corpo. ligados uns aos outros por pontes localizadas nas extremidades do corpo. Corpo atravessado por 4-6 estrias(5-10 ténias) na fronteira em ténias largas, 8–16 $\mu$ de largura e contínuas, embora não muito paralelas. ténias de largura constante e extremos visíveis (Glikson, 2020).   |
| <i>Protohaploxypinus diagonalis</i><br>(Balme 1963)                    | Pólen bissacado haploxilonóide, sacos menores que o corpo. Ténias oblíquas, não paralelas, totalizando 8 a 10. Contorno do corpo vagamente discernível (Glikson, 2020).  |
| <i>Protohaploxypinus limpidus</i><br>(Balme and Hennelly 1955)         | Pólen bissacado, de contorno geralmente oval, alongado no sentido transversal, haploxilonóide. Corpo central de parede fina, de coloração mais clara que os sacos, e contornos dificilmente identificáveis. Com 5 a 14 ténias completas de largura e extremos não identificar.   |
| <i>Striatopodocarpites cancellatus</i> (Balme y Hennelly) Hart 1963    | Grão de pólen bissacado, contorno geral manchado oval alongado transversalmente. Corpo central circular, de paredes espessas. Nas bases dos sacos pode ter algumas dobras radiais. Sacos mais largos que o corpo, corpo dividida entre 8 a 10 ténias transversais, Contorno dos sacos irregular.   |
| <i>Striatopodocarpites gondwanensis</i> Lekhanpal, Sah y Dube 1960     | Diploxilonóide, Sacos maiores que o corpo (cerca do dobro), de altura semelhante ao corpo central. Corpo central oval a afinado longitudinalmente Corpo dividido em mais de 7 ténias transversais, completas.  |
| <i>Striatopodocarpites fusus</i><br>(Balme y Hennelly)                 | Pólen Fortemente diploxilonóide. área de sobreposição entre sacos e corpo largo, até metade da largura do saco. “sacos escuros em relação ao Corpo”.   |
| <i>Cannanoropollis janakii</i><br>Potonié y Sah 1960                   | Pólen monossacado de simetria radial de contorno geralmente circular, corpo central de exina fina que o conferem uma coloração mais clara que o saco. Saco de espessura constante. A sexina do saco é infrareticulado apresentando murros irregulares.   |

**Estampa 1**

Escala:  20µm



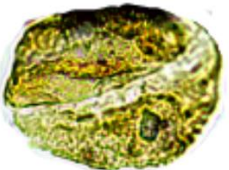
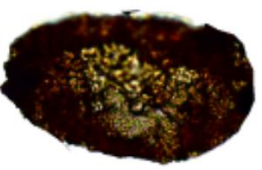
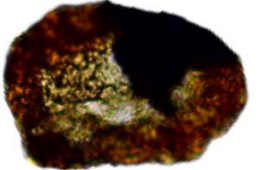
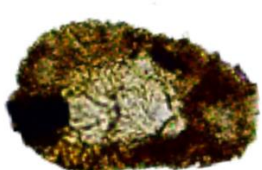
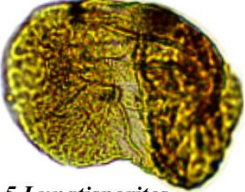
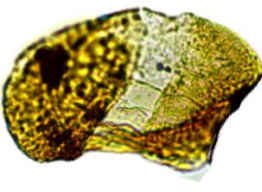
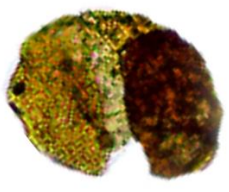
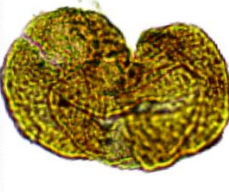
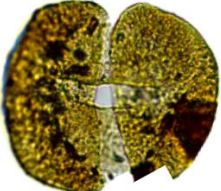
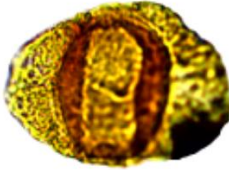
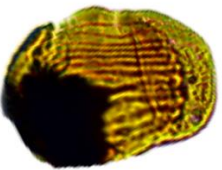
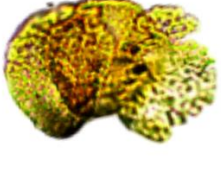
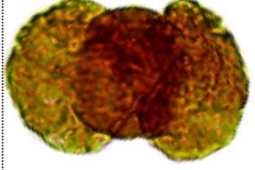
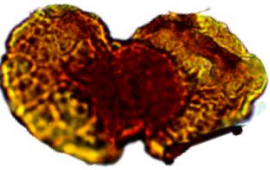
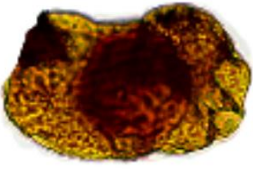
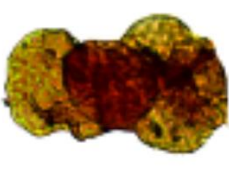
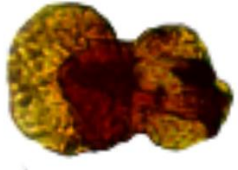
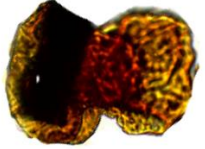
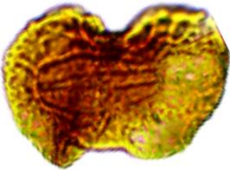
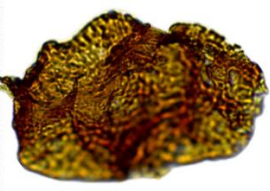



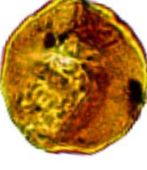
**Estampa 2**

Escala:  20µm

|   |   |  |   |
|---|---|--|---|
|    |    |    |    |
| 1. <i>Guttulapollenites hannonicos</i>  | 2. <i>Guttulapollenites hannonicos</i>  | 3. <i>Staurosaccites cordubensis</i>   | 4. <i>Weylandites lucifer</i>   |
|    |    |    |    |
| 5. <i>Weylandites lucifer</i>   | 6. <i>Weylandites lucifer</i>   | 7. <i>Weylandites lucifer</i>  | 8. <i>Weylandites lucifer</i>   |
|   |   |   |   |
| 9. <i>Weylandites magnus</i>  | 10. <i>Weylandites magnus</i>   | 11. <i>Weylandites magnus</i>  | 12. <i>Weylandites magnus</i>   |
|  |  |  |  |
| 13. <i>Weylandites magnus</i>   | 14. <i>Vittatina subsacata</i>  | 15. <i>Vittatina fasciolata</i>  | 16. <i>Protohaploxypinus limpibus</i>   |
|  |  |  |  |
| 17. <i>Protohaploxypinus limpibus</i>   | 18. <i>Scheuringipollenites ovatus</i>  | 19. <i>Scheuringipollenites ovatus</i>   | 20. <i>Scheuringipollenites ovatus</i>  |
|  |  |  |  |
| 21. <i>Scheuringipollenites maximus</i>   | 22. <i>Scheuringipollenites maximus</i>   | 23. <i>Scheuringipollenites medius</i>   | 24. <i>Scheuringipollenites medius</i>  |

**Estampa 3**

Escala:  20µm

|  |  |   |  |
|--|--|---|--|
| <br><i>1.Scheuringipollenites maximus</i>       | <br><i>2.Cannanoropollis janakii</i>            | <br><i>3.Cannanoropollis janakii</i>            | <br><i>4.Cannanoropollis janakii</i>            |
| <br><i>5.Lunatisporites variesectus</i>         | <br><i>6.Lunatisporites variesectus</i>         | <br><i>7.Lunatisporites variesectus</i>         | <br><i>8. Lueckisporites virkkiae</i>           |
| <br><i>9.Lueckisporites virkkiae</i>           | <br><i>10.Potonieisporites brasiliensis</i>    | <br><i>11.Protohaploxypinus goraiensis</i>     | <br><i>12.Striatopodocarpites fusus</i>        |
| <br><i>13.Striatopodocarpites fusus</i>       | <br><i>14.Striatopodocarpites cancellatus</i> | <br><i>15.Striatopodocarpites cancellatus</i> | <br><i>16.Striatopodocarpites cancellatus</i> |
| <br><i>17.Striatopodocarpites cancellatus</i> | <br><i>18.Striatopodocarpites cancellatus</i> | <br><i>19.Protohaploxypinus goraiensis</i>    | <br><i>20.Protohaploxypinus diagonalis</i>    |
| <br><i>21.Gnetaceapollenites sinuosus</i>     | <br><i>22.Cycadopites cymbatus</i>            | <br><i>23.Cycadopites cymbatus</i>             | <br><i>24.Cycadopites cymbatus</i>            |

**Estampa 4**

Escala:  20µm

