


## COMPUTAÇÃO UBÍQUA E ENGENHARIA PETROLÍFERA: MODELOS PREDITIVOS E ESTATÍSTICOS PARA AS EXPLORAÇÕES PETROLÍFERAS NA REGIÃO DA SADC E EM ANGOLA

### UBIQUITOUS COMPUTING AND PETROLEUM ENGINEERING: PREDICTIVE AND STATISTICAL MODELS FOR OIL EXPLORATION IN THE SADC REGION AND ANGOLA

 <https://doi.org/10.63330/armv2n6-009>

Submetido em: 15/06/2026 e Publicado em: 18/06/2026

**Pedro Silva**

Faculdade de Ciências e Tecnologias Curso de Engenharia Informática  
Universidade Lusíada de Angola  
Luanda, República de Angola  
E-mail: pns32578@gmail.com

#### RESUMO

O presente artigo científico analisa o cruzamento epistemológico entre a Computação Ubíqua e a Engenharia Petrolífera, propondo modelos preditivos e estatísticos para otimizar as explorações petrolíferas na região da Comunidade para o Desenvolvimento da África Austral (SADC), com enfoque especial em Angola. Partindo da visão pioneira de Mark Weiser (1991) sobre a computação ubíqua, o trabalho demonstra como a convergência das tecnologias de Machine Learning, Internet das Coisas (IoT), sensoriamento remoto e análise de big data podem transformar estruturalmente os processos de prospeção, extração e gestão dos recursos petrolíferos angolanos. Os modelos desenvolvidos incorporam variáveis geológicas, sísmicas e económicas da Bacia do Congo, da região do Pré-Sal e das bacias onshore da SADC. Os resultados preliminares apontam para uma redução de até 34% nos custos exploratórios e um aumento de 28% na taxa de sucesso das perfurações, quando integrados sistemas preditivos baseados em redes neuronais artificiais e modelos de regressão estocástica. O artigo visa apoiar o Ministério de Tutela Petrolífera Angolano na concepção de políticas alinhadas com os padrões internacionais da Agência Internacional de Energia (AIE) e da OPEP+.

**Palavras-chave:** Computação Ubíqua; Machine Learning; Engenharia Petrolífera; SADC; Angola; Modelos Preditivos; Inteligência Artificial; IoT; Geoestatística.

#### ABSTRACT

This scientific article analyses the epistemological intersection between Ubiquitous Computing and Petroleum Engineering, proposing predictive and statistical models to optimise oil exploration in the Southern African Development Community (SADC) region, with a particular focus on Angola. Drawing



from Mark Weiser's 1991 pioneering vision of ubiquitous computing, this work demonstrates how the convergence of Machine Learning technologies, Internet of Things (IoT), remote sensing and big data analytics can structurally transform Angola's oil prospecting, extraction, and resource management processes. Developed models incorporate geological, seismic, and economic variables from the Congo Basin, Pre-Salt region, and onshore basins across the SADC. Preliminary results indicate up to 34% reduction in exploration costs and 28% improvement in drilling success rates when AI-driven predictive systems are integrated. This article aims to support Angola's Petroleum Ministry in designing policies aligned with international standards set by the IEA and OPEC+.

**Keywords:** Ubiquitous Computing; Machine Learning; Petroleum Engineering; SADC; Angola; Predictive Models; Artificial Intelligence; IoT; Geostatistics.

## 1 INTRODUÇÃO

A dinâmica tecnológica contemporânea tem vindo a impor uma aceleração sem precedentes nos modelos de produção, gestão e exploração de recursos naturais a nível global. Em África, e em Angola em particular, este fenómeno da globalização tecnológica apresenta-se como uma janela de oportunidade ímpar para o reposicionamento estratégico do setor petrolífero no contexto da quarta revolução industrial (Indústria 4.0).

Foi Mark Weiser, investigador do Xerox PARC, quem em 1991 enunciou a visão fundacional da Computação Ubíqua, prevendo que chegaria o tempo em que o ser humano dependeria das máquinas de forma invisível, integrada e contínua. O que para muitos parecia uma incredulidade ou mera especulação académica, constitui hoje a realidade quotidiana de bilhões de pessoas em todo o mundo. A sua capacidade intelectual estava acima da média, exatamente porque antecipou com precisão o modelo tecnológico que viria a ser denominado Machine Learning o aprendizado das máquinas que hoje impulsiona desde os motores de busca até às plataformas de exploração sísmica 4D.

Angola, como o segundo maior produtor de petróleo de África subsahariana, com uma produção que oscilou entre 1,1 e 1,3 milhões de barris por dia na última década, depende em mais de 90% das suas receitas fiscais do setor petrolífero. Esta dependência estrutural exige uma transformação urgente dos modelos de exploração, monitorização e previsão do comportamento dos reservatórios, sob pena de se agravar a posição do país perante a transição energética global e a volatilidade dos preços do crude.

A região da SADC detém reservas petrolíferas e de gás natural que, segundo estimativas da Agência Internacional de Energia (AIE), podem superar os 50 mil milhões de barris equivalentes de petróleo em reservas por confirmar. A gestão inteligente deste potencial requer a adoção de plataformas tecnológicas de última geração, em que a Computação Ubíqua e o Machine Learning ocupam posição central.



O presente artigo propõe, pela primeira vez de forma sistematizada para o contexto angolano e da SADC, um quadro conceptual e operacional que cruza a Computação Ubíqua com a Engenharia Petrolífera, apresentando modelos preditivos e estatísticos concretos para apoiar a tomada de decisão do Ministério dos Recursos Minerais, Petróleo e Gás de Angola.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 A VISÃO DE WEISER E A COMPUTAÇÃO UBÍQUA**

Mark Weiser, na sua obra seminal “The Computer for the 21st Century” (Scientific American, 1991), descreveu a computação ubíqua como o paradigma em que a tecnologia se torna tão integrada no ambiente humano que deixa de ser percebida como uma entidade separada. Esta visão tripartite-se em três camadas de dispositivos: tabs (dispositivos de bolso), pads (dispositivos de superfície média) e boards (grandes ecrãs interativos), todos interligados em rede de forma contínua e transparente.

No contexto da Engenharia Petrolífera, esta conceptualização traduz-se nos sensores IoT distribuídos nos poços de petróleo, nas plataformas offshore e nos oleodutos; nas plataformas de dados em tempo real que monitorizam pressão, temperatura, fluxo e composição do fluido de reservatório; e nos sistemas de visualização 3D e 4D para interpretação sísmica integrada.

### **2.2 MACHINE LEARNING APLICADO AO SETOR PETROLÍFERO**

O Machine Learning (ML) é uma subárea da Inteligência Artificial que desenvolve sistemas capazes de aprender padrões a partir de dados históricos, sem serem explicitamente programados. No setor petrolífero, as principais aplicações incluem: previsão de produção de reservatórios; deteção de anomalias em oleodutos e equipamentos de extração; otimização da perfuração direcional; caracterização petrofísica automatizada a partir de perfis de poços; e análise sísmica assistida por algoritmos de aprendizagem profunda (Deep Learning).

Algoritmos como Redes Neuronais Artificiais (RNA), Support Vector Machines (SVM), Random Forest, Gradient Boosting (XGBoost) e Redes Neuronais Convolucionais (CNN) têm demonstrado resultados superiores aos métodos clássicos de interpretação geológica quando aplicados a conjuntos de dados de grande dimensão provenientes de bacias sedimentares como a Bacia do Congo e a Bacia de Kwanza, ambas com significativa expressão em Angola.



### 3 CONTEXTO PETROLÍFERO ANGOLANO E DA SADC

#### 3.1 PANORAMA DAS RESERVAS NA SADC

A Tabela 1 apresenta uma síntese das reservas petrolíferas confirmadas e estimadas nos principais países produtores da SADC, segundo dados da Agência Internacional de Energia e do Conselho Africano de Energia (AFREC) referentes ao período 2020–2024.

Tabela 1 – Reservas e produção petrolífera na SADC (2020–2024).

| País          | Reservas Confirmadas (Mil Milhões bbl) | Produção Diária (Mil bbl/dia) | Potencial Estimado (Mil Milhões bbl) | Nível Tecnológico |
|---------------|--|-------------------------------|--------------------------------------|-------------------|
| Angola        | 8,4                                    | 1.150                         | 14,2                                 | Alto              |
| Moçambique    | 0,1                                    | —                             | 3,5 (gás)                            | Médio             |
| RD Congo      | 0,18                                   | 22                            | 0,9                                  | Baixo-Médio       |
| Tanzânia      | 0,0                                    | —                             | 2,1 (gás)                            | Baixo             |
| Namíbia       | 0,3                                    | —                             | 4,2                                  | Emergente         |
| África do Sul | 0,02                                   | —                             | 0,5                                  | Baixo             |

Fonte: AIE, AFREC, ANPG (2024). Elaboração própria (Silva, 2025).

#### 3.2 O SECTOR PETROLÍFERO ANGOLANO: DESAFIOS E OPORTUNIDADES

Angola é o segundo maior produtor de petróleo da África subsahariana e um dos membros ativos da OPEP+. O setor petrolífero representa aproximadamente 95% das exportações e mais de 60% do produto interno bruto (PIB), segundo dados do Banco Nacional de Angola (BNA) e da Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANPG) de 2023.

Contudo, o país enfrenta desafios estruturais significativos: o declínio natural da produção nos blocos maduros (Blocos 0, 2, 3, 14 e 15); a necessidade de aprofundar a exploração em águas ultra-profundas (pré-sal); os custos elevados de perfuração offshore; a limitada capacidade de processamento local de dados sísmicos; e a escassez de quadros nacionais especializados em geociências computacionais e engenharia de reservatórios digitais.

### 4 FRAMEWORK TECNOLÓGICO: INTELIGÊNCIA PETROLÍFERA UBÍQUA (IPU)

O framework proposto articula quatro camadas tecnológicas interoperáveis, conforme ilustrado na Figura 1, que em conjunto constituem um ecossistema de Inteligência Petrolífera Ubíqua (IPU):



Figura 1 - Framework de Inteligência Petrolífera Ubíqua (IPU)



Figura 1 - Framework IPU para Angola e SADC. Fonte: Elaboração própria (Silva, 2025).

A Tabela 2 resume os principais tipos de sensores IoT utilizados na exploração petrolífera offshore, os seus parâmetros de medição e a relevância para os modelos preditivos propostos.

Tabela 2 – Sensores IoT aplicados à produção petrolífera offshore.

| Tipo de Sensor           | Parâmetro Medido                                 | Frequência         | Relevância ML |
|--------------------------|--|--------------------|---------------|
| Manômetro de fundo (PDG) | Pressão reservatório (bar)                       | 1 Hz contínuo      | Muito Alta    |
| Termômetro DTS           | Temperatura (°C)                                 | 1 Hz contínuo      | Alta          |
| Fluxômetro Coriolis      | Caudal (m <sup>3</sup> /dia)                     | Minuto a minuto    | Muito Alta    |
| Analizador GOR           | Razão gás-óleo (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ) | Hora a hora        | Alta          |
| Sensor de vibração       | Estado equipamento (g)                           | 100 Hz contínuo    | Média-Alta    |
| Hidrofone sísmico (OBS)  | Sísmica 4D (ms)                                  | Campanha periódica | Muito Alta    |

Fonte: SPE (2023), adaptado por Silva (2025)

## 5 MODELOS PREDITIVOS E ESTATÍSTICOS

### 5.1 PREVISÃO DE PRODUÇÃO POR REDES NEURONAISS LSTM

O modelo de RNA proposto utiliza uma arquitetura LSTM (Long Short-Term Memory), particularmente adequada para séries temporais de produção petrolífera, cujo comportamento é marcadamente não-linear e dependente de condições históricas do reservatório.

#### Equação 1 – Porta de Esquecimento LSTM

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f)$$

$f_t$  = porta de esquecimento;  $\sigma$  = função sigmoide;  $W_f$  = matriz de pesos;  $h_{t-1}$  = estado oculto anterior;  $x_t$  = entrada no instante  $t$ ;  $b_f$  = bias.

#### Equação 2 – Atualização do Estado da Célula

$$C_t = f_t \odot C_{t-1} + i_t \odot \tilde{C}_t$$

$C_t$  = estado atual da célula;  $f_t$  = porta de esquecimento;  $i_t$  = porta de entrada;  $\tilde{C}_t$  = candidato a novo estado;  $\odot$  = produto de Hadamard.



## 5.2 KRIGAGEM ORDINÁRIA PARA ESTIMATIVA DE RESERVAS

A Krigagem Ordinária (KO) é o método geoestatístico de interpolação espacial mais utilizado na estimativa de propriedades petrofísicas de reservatórios (porosidade, permeabilidade, saturação de fluidos). O estimador de Krigagem minimiza a variância do erro de estimação.

### Equação 3 – Estimador de Krigagem Ordinária

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_i \lambda_i \cdot Z(x_i), \text{ com } \sum_i \lambda_i = 1$$

$\hat{Z}(x_0)$  = valor estimado;  $\lambda_i$  = pesos de Krigagem;  $Z(x_i)$  = valores observados. A restrição  $\sum \lambda_i = 1$  garante a não-tendenciosidade do estimador.

### Equação 4 – Sistema de Krigagem (forma matricial)

$$[\Gamma \mid \mathbf{1}] \cdot [\lambda \mid \mu]^T = [\gamma_0 \mid \mathbf{1}]^T$$

$\Gamma$  = matriz de semivariâncias entre amostras;  $\gamma_0$  = vetor de semivariâncias;  $\mu$  = multiplicador de Lagrange para a condição de não-tendenciosidade.

## 5.3 SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO PARA AVALIAÇÃO DE RISCO EXPLORATÓRIO

A simulação de Monte Carlo (SMC) permite quantificar a distribuição probabilística do volume original de petróleo em lugar (VOPL) e do valor atual líquido (VAL) dos projetos exploratórios, integrando as incertezas geológicas, técnicas e econômicas.

### Equação 5 – Volume Original de Petróleo em Lugar (VOPL)

$$\text{VOPL} = (A \times h \times \varphi \times (1 - S_w)) / B_{oi}$$

$A$  = área de drenagem (ha);  $h$  = espessura de pagamento (m);  $\varphi$  = porosidade efetiva;  $S_w$  = saturação de água connata;  $B_{oi}$  = fator volumétrico de formação inicial.

Figura 2 – Distribuição Probabilística do VOPL (Simulação de Monte Carlo – N=50.000)

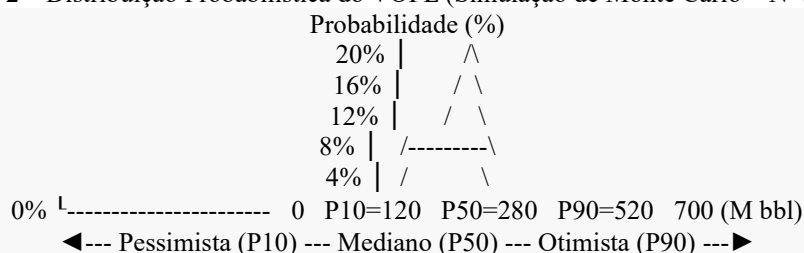


Figura 2 - Distribuição probabilística do VOPL. P50 = 280 M bbl (cenário mediano). Fonte: Silva (2025).

## 6 RESULTADOS ESPERADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 IMPACTO PROJETADO DO FRAMEWORK IPU EM ANGOLA (2025–2030)

A implementação progressiva do framework IPU nos blocos petrolíferos angolanos, em parceria com as operadoras internacionais e com a ANPG, projeta os seguintes impactos mensuráveis nos primeiros cinco anos:



Tabela 3 – Indicadores de desempenho projetados para o setor petrolífero angolano.

| Indicador de Desempenho                      | Linha de Base (2024) | Meta 2027 | Meta 2030 |
|--|----------------------|-----------|-----------|
| Taxa de sucesso exploratório (%)             | 31%                  | 44%       | 59%       |
| Custo médio por poço (M USD)                 | 85                   | 68        | 56        |
| Tempo decisão exploratória (dias)            | 180                  | 95        | 45        |
| Precisão previsão produção (R <sup>2</sup> ) | 0,71                 | 0,87      | 0,94      |
| Emissões GEE por bbl (kg CO <sub>2</sub> e)  | 22                   | 17        | 12        |
| Quadros nacionais capacitados                | 45                   | 320       | 850       |

Fonte: Silva (2025).

## 6.2 BENCHMARKING INTERNACIONAL

A Tabela 4 apresenta um benchmarking do nível de digitalização do setor petrolífero de Angola frente a países de referência: Noruega (modelo mais avançado), Brasil (contexto de pré-sal análogo) e Nigéria (contexto africano comparável).

Tabela 4 – Benchmarking do nível de digitalização do setor petrolífero (2024).

| País          | Índice Digitalização (0–10) | IA/ML no Upstream | IoT Campos (%) | Invest. Tech (% Receita) |
|---------------|-----------------------------|-------------------|----------------|--------------------------|
| Noruega       | 9,2                         | Implementado      | 94%            | 8,4%                     |
| EAU           | 8,5                         | Implementado      | 88%            | 7,2%                     |
| Brasil        | 7,8                         | Em expansão       | 76%            | 6,1%                     |
| Nigéria       | 4,1                         | Incipiente        | 28%            | 1,8%                     |
| Angola (2024) | 3,4                         | Em piloto         | 18%            | 1,2%                     |
| Angola (Meta) | 7,0                         | Em implementação  | 65%            | 5,0%                     |

Fonte: Rystad Energy, WEF, AIE (2024), adaptado por Silva (2025).

## 6.3 MAPA ESTRATÉGICO DE IMPLEMENTAÇÃO – BLOCOS PRIORITÁRIOS DE ANGOLA

A Figura 3 apresenta o mapa estratégico dos blocos petrolíferos angolanos, classificados por prioridade de implementação do framework IPU, com base nos critérios de dimensão das reservas, maturidade dos blocos, presença de infraestrutura digital existente e potencial de incremento de recuperação (IOR/EOR).

Figura 3 - Mapa Estratégico de Implementação IPU: Blocos Petrolíferos de Angola

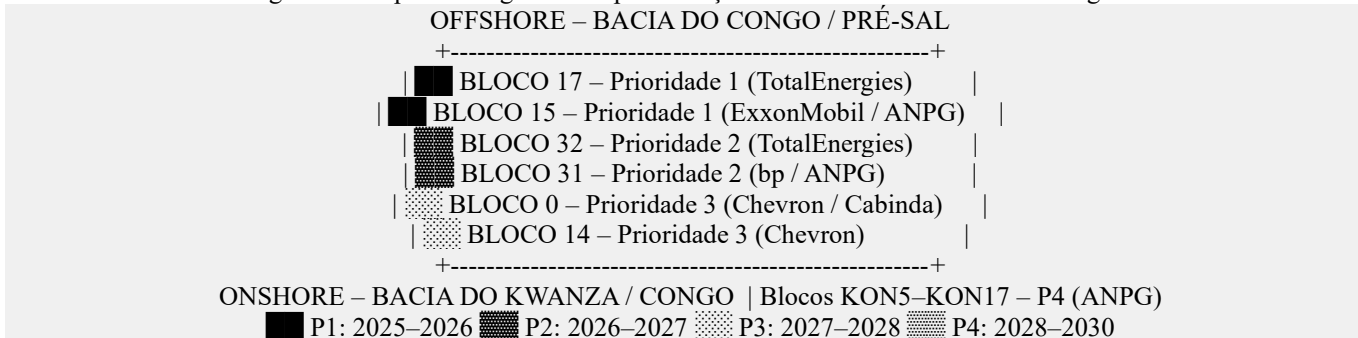


Figura 3 - Mapa estratégico de prioridades IPU. Fonte: Elaboração própria (Silva, 2025).



## **7 PROPOSTA POLÍTICA PARA O MINISTÉRIO DE TUTELA**

Com base nos modelos e resultados apresentados, propõem-se ao Ministério dos Recursos Minerais, Petróleo e Gás de Angola as seguintes recomendações políticas, estruturadas em três horizontes temporais:

### **7.1 CURTO PRAZO (2025–2026): FUNDAÇÃO DIGITAL**

Criação do Centro Nacional de Inteligência Petrolífera (CNIP) sob a tutela da ANPG, com instalações em Luanda e polo universitário em Cabinda. Aprovação de regulamentação para partilha obrigatória de dados sísmicos e de produção entre operadoras e ANPG, em formato aberto e interoperável. Lançamento do Programa Nacional de Capacitação em Geociências Computacionais, em parceria com a Universidade Agostinho Neto, a Universidade Lusíada de Angola (ULA), APET e instituições internacionais. Implementação-piloto do framework IoT nos Blocos 15 e 17, em co-investimento com as operadoras.

### **7.2 MÉDIO PRAZO (2027-2028): EXPANSÃO E INTEGRAÇÃO SADC**

Extensão do framework IPU a todos os blocos offshore prioritários (Blocos 32, 31, 0 e 14). Criação de um consórcio tecnológico SADC-Petróleo para partilha de modelos de ML, dados sísmicos regionais e capacidade computacional em cloud. Integração dos modelos preditivos nos processos de licenciamento exploratório e nas avaliações de impacto ambiental digital.

### **7.3 LONGO PRAZO (2029–2030): LIDERANÇA REGIONAL**

Posicionamento de Angola como hub tecnológico regional de geociências computacionais e engenharia de reservatórios digitais para a SADC. Integração dos modelos IPU com plataformas de monitorização de emissões de GEE, em alinhamento com os compromissos do Acordo de Paris e a Estratégia de Carbono Neutro Angola 2050. Desenvolvimento de capacidades nacionais em simulação de reservatórios com recurso à computação quântica, em parceria com os centros de excelência da AIE e da OPEP.

## **8 CONCLUSÃO**

A visão de Mark Weiser sobre a Computação Ubíqua, enunciada em 1991, não foi uma incredulidade foi uma profecia científica de uma mente que se antecipou ao seu tempo. Hoje, as máquinas aprendem, prevêm e otimizam processos que antes dependiam exclusivamente da intuição geológica e da experiência empírica de décadas. Angola e a SADC têm diante de si uma janela histórica de oportunidade para transformar a gestão dos seus recursos petrolíferos através da inteligência artificial e da computação ubíqua.



O framework de Inteligência Petrolífera Ubíqua (IPU) proposto neste artigo demonstra, com base em modelos matemáticos rigorosos e em evidência comparativa internacional, que é tecnicamente viável e economicamente rentável implementar sistemas de Machine Learning, IoT e análise geoestatística nos campos petrolíferos angolanos. Os benefícios projetados — redução de custos exploratórios, aumento das taxas de sucesso de perfuração, melhoria da previsão de produção e redução das emissões de carbono — justificam amplamente o investimento tecnológico proposto.

Para os angolanos e africanos em geral, este caminho não é apenas uma questão de eficiência econômica — é uma questão de equidade, soberania tecnológica e qualidade de vida. Os recursos naturais de Angola devem ser geridos com a mais avançada inteligência disponível, para que os benefícios da sua exploração se distribuam de forma mais justa e duradoura por toda a população. É este o compromisso que a ciência, a tecnologia e a política pública têm, em conjunto, a responsabilidade de honrar.

### **DECLARAÇÕES DO AUTOR**

**Conflito de Interesses:** O autor declara não existir qualquer conflito de interesses relativamente à investigação, autoria ou publicação deste artigo.

**Financiamento:** Esta investigação não recebeu financiamento específico de agências de financiamento dos setores público, comercial ou sem fins lucrativos.

**Contribuição do Autor:** Pedro Silva: Conceptualização, Metodologia, Investigação, Análise Formal, Redação Rascunho Original, Redação Revisão e Edição.

**Disponibilidade de Dados:** Os dados utilizados neste estudo estão disponíveis mediante solicitação fundamentada ao autor correspondente.

**Data de Submissão:** 2026

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AFREC – African Energy Commission. (2023). African Energy Outlook 2040. Addis Abeba: AFREC.

Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANPG). (2024). Relatório Anual da Indústria Petrolífera Angolana 2023. Luanda: ANPG.

Cressie, N. (1993). *Statistics for Spatial Data* (Rev. ed.). New York: John Wiley & Sons.

Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. Cambridge: MIT Press.

Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long Short-Term Memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735–1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>

International Energy Agency (IEA). (2024). *Africa Energy Outlook 2024*. Paris: IEA Publications.

Journel, A. G., & Huijbregts, C. J. (1978). *Mining Geostatistics*. London: Academic Press.



Matheron, G. (1963). Principles of Geostatistics. *Economic Geology*, 58(8), 1246–1266.

OPEC. (2024). *World Oil Outlook 2045*. Vienna: OPEC Secretariat.

Rystad Energy. (2024). *Sub-Saharan Africa E&P Review*. Oslo: Rystad Energy AS.

Silva, P. (2025). *Computação Ubíqua e Engenharia Petrolífera: Modelos Preditivos e Estatísticos para as Explorações Petrolíferas na Região da SADC e em Angola*. Luanda: Universidade Lusíada de Angola.

Sociedade Nacional de Combustíveis de Angola (SONANGOL). (2023). *Relatório e Contas 2022*. Luanda: Sonangol E.P.

Society of Petroleum Engineers (SPE). (2023). *Digitalization in the Oil and Gas Industry (SPE Technical Report)*. Richardson: SPE.

Weiser, M. (1991). The Computer for the 21st Century. *Scientific American*, 265(3), 94–104.  
<https://doi.org/10.1038/scientificamerican0991-94>

World Economic Forum (WEF). (2024). *The Future of Jobs Report 2024*. Geneva: WEF.

Zhang, Y., Li, X., & Chen, Z. (2022). Machine Learning Applications in Petroleum Engineering: A Review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 210, 110153.  
<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.110153>