



## Modelagem Geoestatística da Reserva Lavrável de Argila Para Fabricação de Cerâmica Vermelha na Bacia do Baixo Jaguaribe, Russas (CE)

Silva<sup>1</sup>, Cristiano Alves; Vasconcelos<sup>2</sup>, Sonia Maria Silva; Duarte<sup>2</sup>, Cynthia Romariz

**Resumo:** O Polo Ceramista do Baixo Jaguaribe é o maior do Estado do Ceará, com 137 cerâmicas em atividade no ano de 2012 (Cavalcanti *et al.*, 2014). A extração da argila é realizada de forma pulverizada em pequenas frentes de lavra, abertas sem qualquer critério técnico, fato que ocasiona em muitos casos na exaustão precoce da jazida e consequente abandono da cava, acarretando graves impactos ambientais. Para mitigar tais impactos, é necessário diminuir o número de áreas de extração, concentrando a exploração em áreas onde a argila possua maior profundidade. Neste contexto, a modelagem geoestatística é aplicada aqui para um melhor entendimento do comportamento espacial da reserva lavrável de argila na área de estudo, contribuindo para o ordenamento de sua exploração, com respeito ao meio ambiente e garantindo renda e desenvolvimento das populações locais. Na modelagem espacial foi utilizado o interpolador denominado *krigagem*, que usa o conhecimento da correlação espacial obtida pelo variograma para fazer a estimação da variável, possibilitando assim, estimar a espessura da reserva lavrável de argila nos locais não amostrados da área de estudo. Como resultado, foi obtida uma superfície onde a maior espessura da reserva lavrável de argila apresenta orientação SW/NE seguindo a mesma orientação do Rio Jaguaribe.

**Palavras Chave:** Geoestatística; Mineração; Argila.

**Abstract:** *The ceramist polo of Lower Jaguaribe is the largest in the State of Ceará, with 137 ceramics in activity in 2012 (Cavalcanti et al., 2014). The extraction of clay is carried out in a spray form in small fronts mining, open without any technical criteria, a fact that brings in many cases in the early exhaustion of the deposit and consequent abandonment of cava, causing serious environmental impacts. To mitigate these impacts, it is necessary to decrease the number of extraction areas, focusing exploration in areas where the clay has greater depth. In this context, the geostatistical modeling is applied here to a better understanding of the spatial behavior of mineable reserves of clay in the study area, contributing to the planning of their operations, with respect for the environment and*

1 Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM

2 Universidade Federal do Ceará - Departamento de Geologia

Autor para correspondência: Cristiano Alves da Silva

Departamento Nacional de Produção Mineral – Rua Dr. José Lourenço nº 905, Aldeota, CEP 60115-280, Fortaleza, Ceará. E-mail: [cristiano.silva@dnpm.gov.br](mailto:cristiano.silva@dnpm.gov.br)

Recebido em 30 de Julho de 2014 / Aceito em 14 de Outubro de 2014

*ensuring income and development of local populations. In spatial modeling was used interpolator called kriging, using knowledge of the spatial correlation obtained by the variogram to estimate the variable, thus enabling to estimate the thickness of the clay mineable reserves in places not sampled the study area. As a result, an area where the greatest thickness of the clay mineable reserves presents guidance SW / NE following the same orientation Jaguaribe River was obtained.*

**Keywords:** Geostatistical; Mining; Clay.

## 1. INTRODUÇÃO

A mineração de argila no Vale Jaguaribe é realizada de forma pulverizada em pequenas frentes de lavra, em sua maioria, ilegais. Fato ocasionado por diversos fatores, dentre eles a falta de estudos detalhados da reserva disponível, prevalecendo para a escolha das áreas de extração o método empírico de “tentativas e erros”, onde o minerador inicia a extração sem a real noção do volume de material que pode ser extraído do local. Após a exaustão precoce da jazida, muitas áreas são abandonadas depois de explorados meros 0,50m de argila.

De acordo com o inciso IX, Art. 21º da Constituição Federal de 1988, "Compete à União (...), elaborar e executar planos nacionais e regionais de ordenação do território e desenvolvimento econômico e social".

Já o Decreto Nº 62.934, de 1968 (Regulamento do Código de Mineração) em seu Art. 2º estabelece que "é da competência da União administrar os recursos minerais, a indústria de produção mineral e a distribuição, o comércio e consumo de produtos minerais", e em seu Art. 114º determina que "compete ao Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM a execução deste Regulamento, bem como a fiscalização das atividades concernentes à mineração, ao comércio e a industrialização das matérias-primas minerais".

Neste contexto, a Superintendên-

cia do DNPM/CE, em parceria com a Universidade Federal do Ceará – UFC realizou a modelagem geoestatística da espessura da reserva lavrável de argila empregada na fabricação de cerâmica vermelha, em um trecho da bacia do baixo curso do Rio Jaguaribe, município de Russas/CE, com o objetivo de usar esta área como modelo para o ordenamento da exploração de argila para todo o polo ceramista do Vale do Jaguaribe. Tal estudo fez parte do Projeto Organização e Formalização das Atividades de Extração de Argila no Baixo Jaguaribe - Ceará, concluído pela Superintendência do DNPM/CE em 2013.

A falta de critério para escolha das áreas de exploração acarreta vários problemas ambientais e sociais, tais como, desmatamento indiscriminado, uma vez que para exploração da argila é necessário suprimir a vegetação nativa; salinização do solo, ocasionado pelo escoamento superficial que lixivia o solo no entorno das áreas de extração acumulando-se nas cavas rasas, com a exposição a dias de sol intenso, a água evapora deixando no solo os sais; e conseqüentemente inviabilização do uso do solo para a agricultura, isto em uma região considerada exceção no contexto semiárido do Estado, com grande potencial agrícola devido à disponibilidade hídrica perene deste trecho do Rio Jaguaribe.

A modelagem geoestatística é aplicada neste estudo como uma abordagem probabilística para a análise e

mapeamento da variável que pode permitir um melhor entendimento do comportamento espacial da reserva lavrável de argila na área de estudo, contribuindo para o ordenamento de sua exploração de forma sustentável, com respeito ao meio ambiente e garantindo a renda e o desenvolvimento das populações locais.

A metodologia utilizada para esta modelagem foi aplicada ao longo de cinco etapas, listadas a seguir e explicadas em maior nível de detalhe na sequência:

- Contextualização dos dados;
- Análise da continuidade espacial

da variável;

- Estimação geoestatística;
- Resultados e discussão;
- Conclusão.

## 2. CONTEXTUALIZAÇÃO DOS DADOS

Para realizar o mapeamento da espessura da reserva lavrável de argila para fabricação de cerâmica vermelha em um trecho do Baixo Jaguaribe, foi escolhida como área de estudo uma porção de aproximadamente 35km<sup>2</sup> no município de Russa/CE, (Figura 1). Esta área será considerada como modelo para o ordenamento da exploração de argila para toda a região.

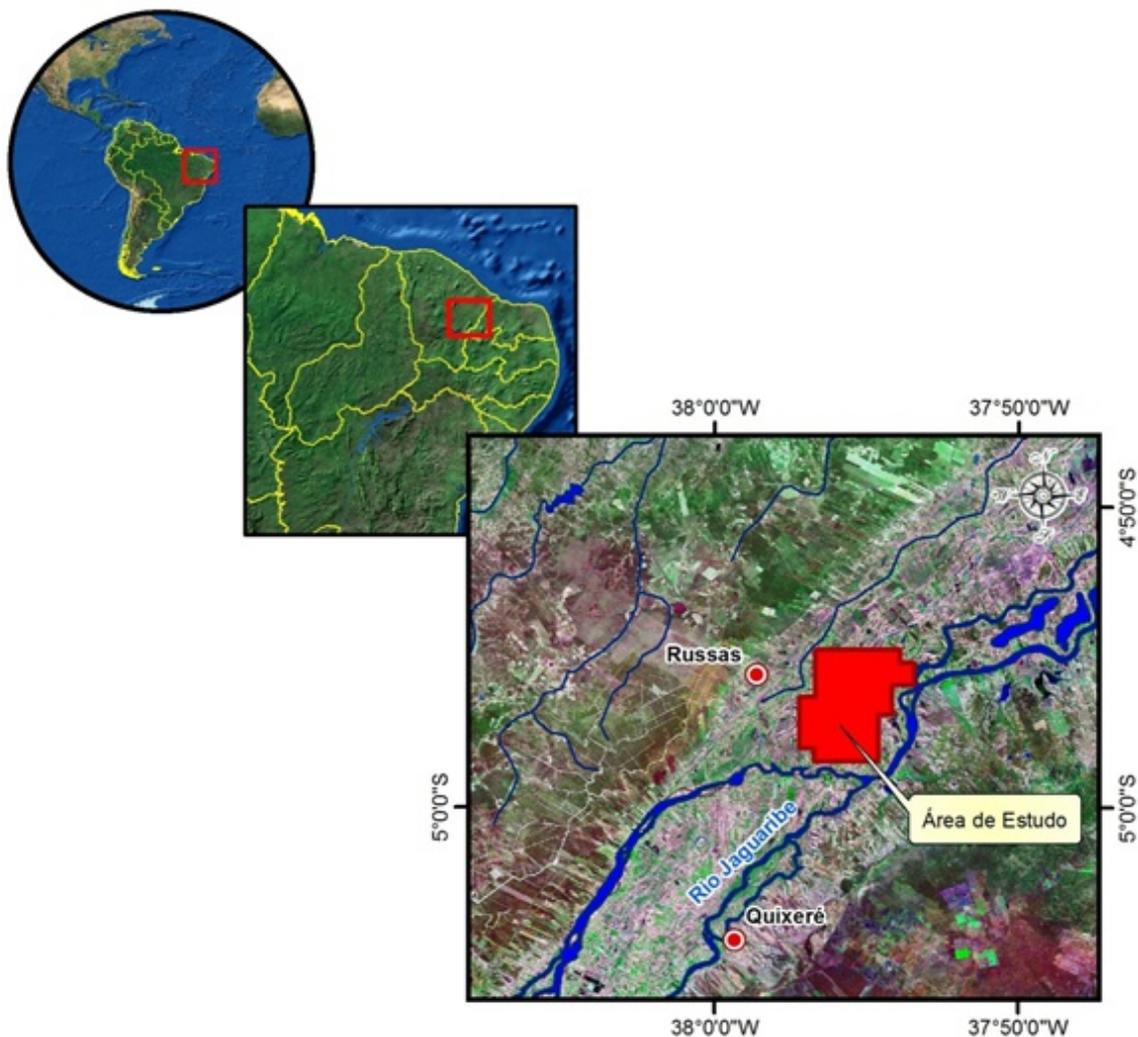


Figura 1: Localização da área de estudo.

De acordo com o cadastro das unidades produtivas do polo cerâmico do Baixo Jaguaribe realizado pelo DNPM em 2012, esta região possui 137 cerâmicas em atividade, sendo 32 destas, ou seja, 23,36% localizadas na área de estudo deste trabalho. Este dado denota a representatividade da área de estudo no contexto de toda a região do polo cerâmico do Baixo Jaguaribe (Cavalcanti *et al.* 2014).

Para realizar a modelagem geoestatística desta porção do polo cerâmico do Baixo Jaguaribe, foram utilizados os perfis de 34 furos de sonda realizados durante o Projeto TECMO (Tecnologia em Cerâmica - Ações para a Modernidade e Competitividade) que foi executado com recursos do PADCT (Programa de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico) do CNPq, no ano 2000 (Parahyba *et al.* 2000).

Como o foco principal do projeto TECMO era a caracterização tecnológica da argila, e não o mapeamento da jazida, as sondagens foram realizadas de forma irregular pela área estudo, sendo o critério de escolha dos locais para perfuração a proximidade de extrações

em atividade.

Vale salientar também que após alguns estudos prévios, os técnicos do projeto TECMO concluíram que a reserva lavrável de argila estava localizada até 5,5m de profundidade, logo as sondagens foram realizadas considerando este patamar. Sendo assim, os perfis de sondagem utilizados neste trabalho não apresentam o pacote de argila em sua totalidade, mas apenas a camada considerada lavrável pelo projeto TECMO.

### 3. ANÁLISE DA CONTINUIDADE ESPACIAL DA VARIÁVEL

Para realizar a modelagem geoestatística neste estudo de caso, foi utilizado o *software* geoMS, *Geostatistical Modelling, software* do Centro de Modelização de Reservatórios Petrolíferos (CMRP), *copyright* CMRP-IST, 2000.

Inicialmente, foi realizada uma análise da estatística descritiva da variável. Tais informações podem ser observadas na Figura 2, bem como a distribuição espacial da variável na Figura 3.

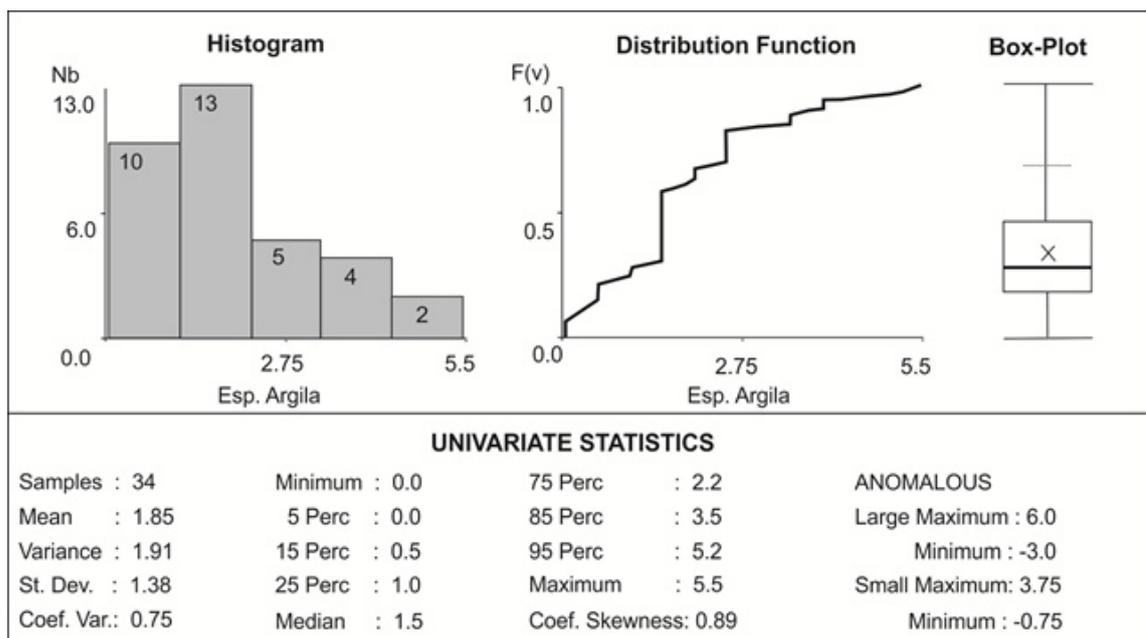


Figura 2: Estatísticas da variável espessura da reserva lavrável de argila – Russas/CE.

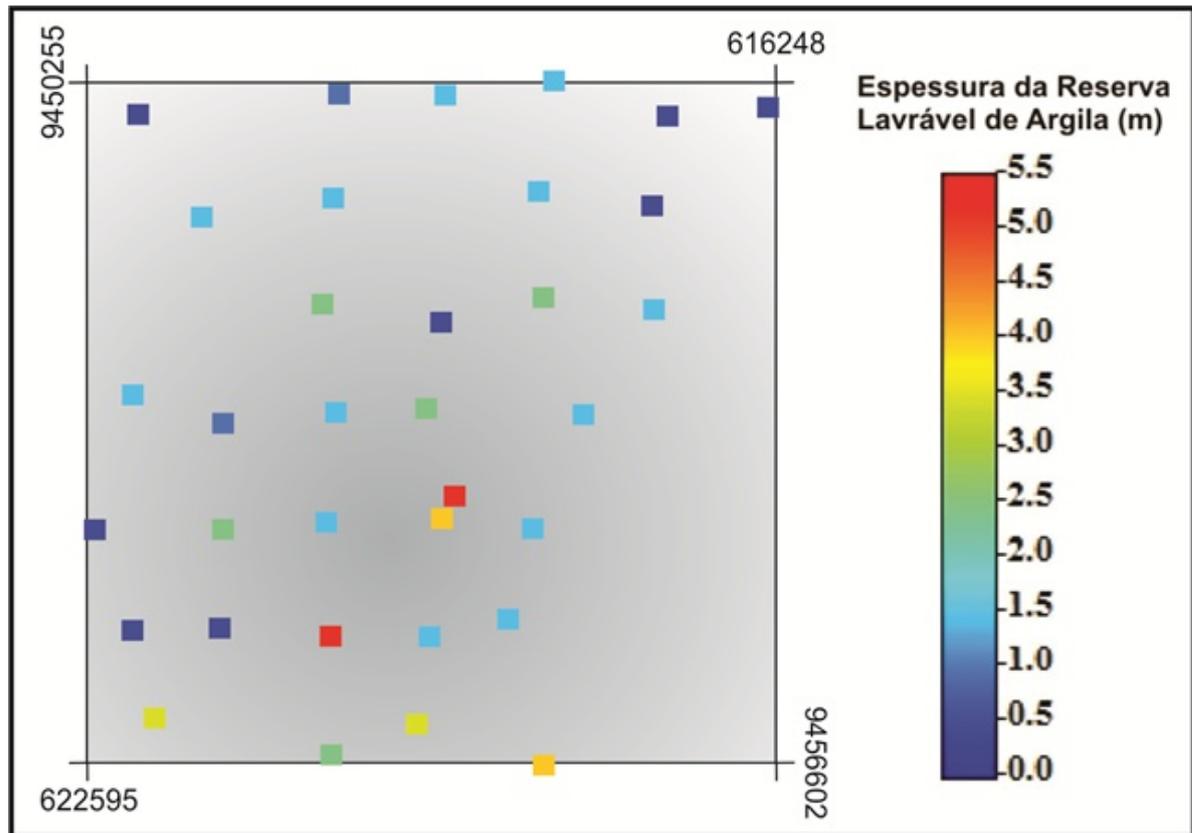


Figura 3: Distribuição espacial da variável reserva lavrável de argila – Russas/CE.

Como é possível observar na Figura 2, os dados amostrados apresentam uma elevada dispersão, apresentando um coeficiente de variação de 75%. Também é possível constatar através do coeficiente de assimetria que a variável apresenta uma assimetria positiva. No histograma a classe de maior frequência não está no centro e no gráfico de *box-plot*, pode ser verificado que a linha que representa a mediana não coincide com o centro da caixa, observações indicadoras de comportamento não gaussiano.

Para realizar a modelagem espacial da variável regionalizada, foram calculados variogramas experimentais em várias direções objetivando a definição dos eixos da elipse de anisotropia e o omnidirecional para definição do raio para o modelo isotrópico.

Na análise exploratória foram calculados os variogramas experimentais, utilizado um espaçamento de 500m (*lag*

*distance* – define a distância onde serão calculados os pontos dos variogramas experimentais), até um limite de 6.000m (*cut distance* - define a distância a partir da qual não são considerados pares de pontos para o cálculo do variograma, relativamente a uma dada direção). Em todos os ajustes foi utilizado o modelo esférico.

Foram calculados semivariogramas  $\gamma(h)$ , que é a metade da função variograma. Entretanto, muitos autores usam simplesmente o termo função variograma para expressá-la. Sendo assim, o valor da função semivariograma aumenta à medida que aumenta a distância de separação entre os pontos, até atingir o patamar, denominado "*still*". O valor de  $\gamma(h)$  nesse ponto é aproximadamente igual à variância total dos dados. A amplitude é um parâmetro fundamental no processo de krigagem uma vez que permite a determinação da distância limite entre dependência e

independência espacial das amostras.

Na tentativa de elucidar o comportamento da variável regionalizada em questão, foram calculados 19 variogramas experimentais entre as direções  $-90^\circ$  e  $90^\circ$ . O resultado pode ser

observado na Figura 4 que apresenta a variação das amplitudes resultantes da modelagem dos variogramas experimentais em relação às direções (ângulo da direção do variograma definido no plano XOY).

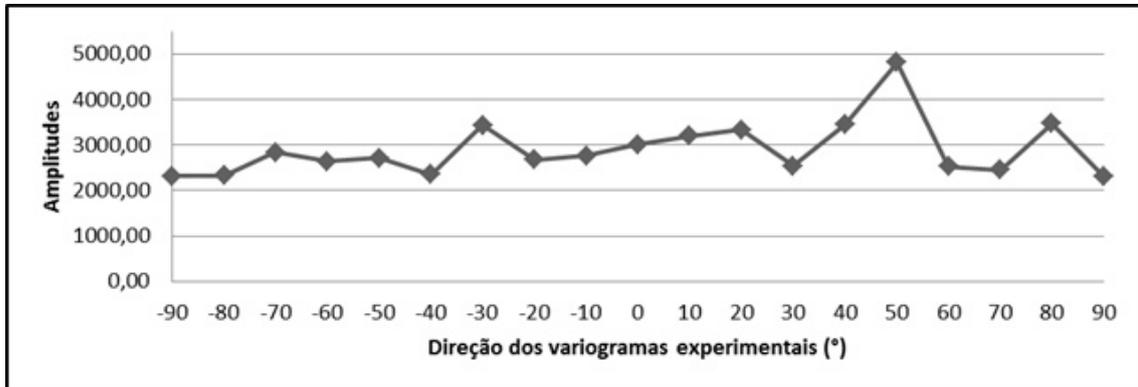


Figura 4: Variação das amplitudes resultantes da modelagem dos variogramas experimentais em relação às direções.

A variação das amplitudes (Figura 4) dos variogramas modelados em relação à direção permite definir a elipse de anisotropia (considerando eixos em direções ortogonais). Neste caso, foi definido o eixo maior na direção  $50^\circ$  (ângulo relativo ao norte geográfico), e

eixo de menor amplitude na direção  $-40^\circ$ . Os variogramas correspondentes à maior e à menor amplitude com o modelo ajustado estão ilustrados na Figura 5.

A modelagem isotrópica foi realizada em variogramas omnidirecionais (Figura 6).

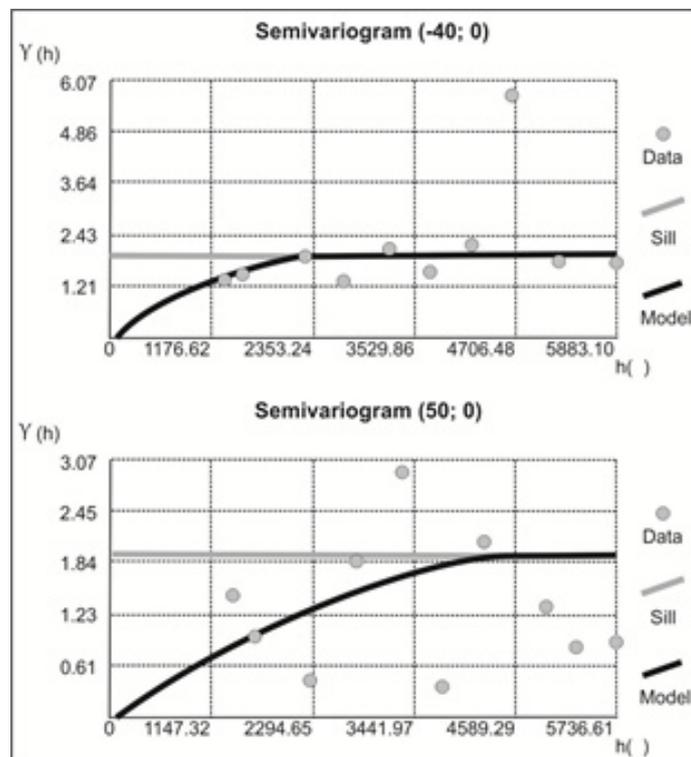


Figura 5: Variogramas ajustados correspondentes às direções de maior e menor amplitude para a variável espessura da reserva lavrável de argila – Modelagem Anisotrópica.

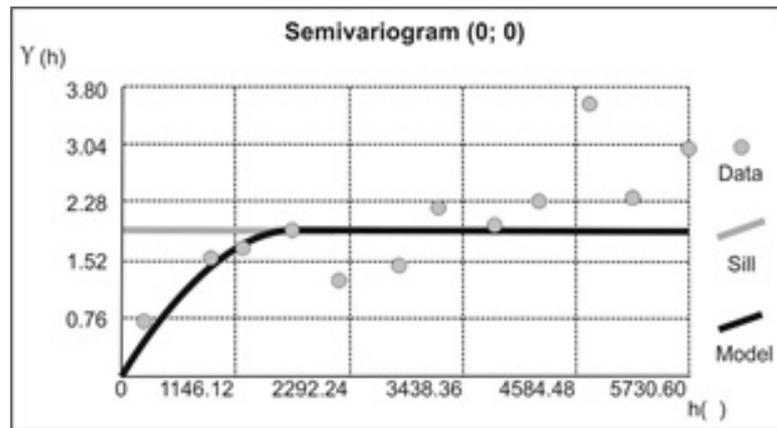


Figura 6. Variograma omnidirecional ajustado da variável espessura da reserva lavrável de argila – Modelagem Isotrópica.

#### 4. ESTIMAÇÃO GEOESTATÍSTICA

Na estimação foi utilizado o interpolador denominado *krigagem*, que usa o conhecimento da correlação espacial obtida pelo variograma para fazer a estimação da variável, possibilitando assim, estimar a espessura da reserva lavrável de argila nos locais não amostrados da área de estudo. A *krigagem* é um interpolador linear (suas estimativas são combinações lineares dos N valores vizinhos da variável observada), exato (pretende que a média e variância dos erros sejam iguais ou as mais próximas possíveis de zero) e estocástico (além de fornecer a estimativa do ponto, fornece também à estimativa de incerteza).

De acordo com Moreira *et al.* (2012), as vantagens da *krigagem* são:

- Considera o número de pontos necessário para se calcular uma média local;
- Integra as características espaciais dos pontos amostrais (orientação e forma da distribuição);
- Otimiza a interpolação através do uso de pesos.

Foram realizadas duas *krigagens* ordinárias<sup>1</sup>, sendo uma anisotrópica e

outra isotrópica. Como *input* destas modelagens, foram usadas às definições de *grid* apresentadas na Tabela 1. Para a modelagem isotrópica foi utilizado como raio o valor de 1.604, correspondente à amplitude obtida no variograma omnidirecional. Já na modelagem anisotrópica foram utilizados os parâmetros de anisotropia resultantes da análise dos variogramas, conforme os dados exibidos na Tabela 2.

As espessuras calculadas usando o modelo isotrópico e anisotrópico apresentaram comportamento aproximadamente normal (Figura 7).

Tabela 1: Parâmetros utilizados no grid de estimação.

Eixo	UTM (Mínimo)	UTM (Máximo)	Espaçamento do Grid	Número de Blocos
X	616000	623000	10m	701
Y	9450000	9457000	10m	701

Tabela 2: Parâmetros de anisotropia resultantes da análise variograma.

Parâmetros	Modelo Anisotrópico
Direção Principal	50
Direção do eixo menor	-40
Raio principal	4818
Raio menor	2353
Razão de anisotropia	2,04

<sup>1</sup> Na *krigagem* ordinária as médias locais não são necessariamente próximas da média da população usando-se apenas os pontos vizinhos para a estimação.

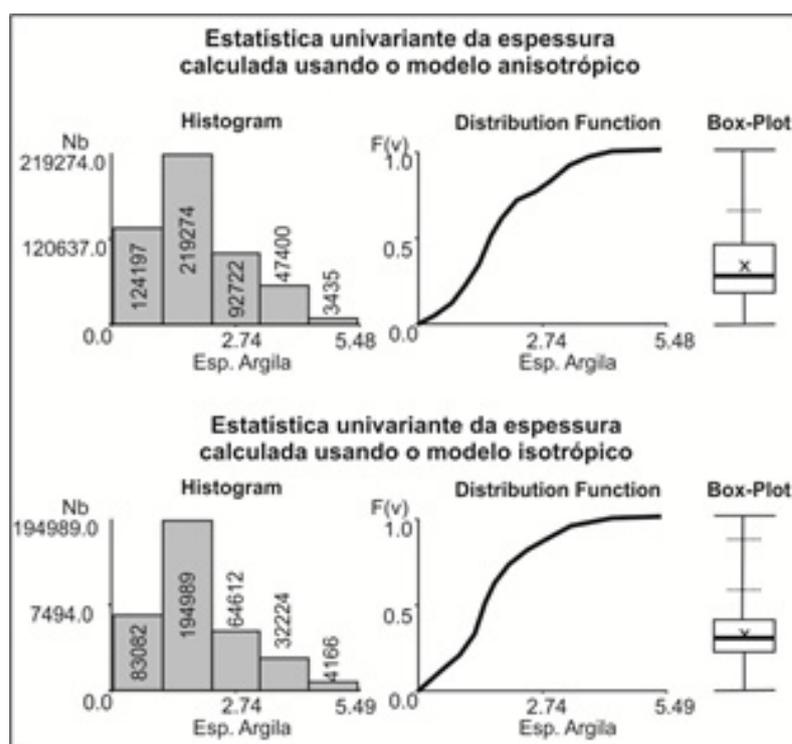


Figura 7. Estatística univariada das espessuras calculadas usando o modelo anisotrópico e isotrópico.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De posse das superfícies estimadas pelo processo de *krigagem* ordinária, utilizando o modelo anisotrópico e isotrópico, realizou-se uma validação cruzada, ou teste do ponto fictício, onde para cada amostra, estima-se sequencialmente o valor da variável regionalizada, considerado desconhecido, calculando o erro de estimação real. A partir da validação cruzada foi possível aferir o coeficiente de correlação entre os valores reais (medidos) e os valores estimados nos dois processos de *krigagem* ordinária.

A concordância do/s resultados é referendada pelos coeficientes de correlação entre os valores reais e os valores estimados: para os valores estimados na modelagem anisotrópica o coeficiente de correlação (Pearson) foi de  $r=0,41$  que é maior que o coeficiente de

correlação para o modelo isotrópico que foi  $r=0,28$ , conforme ilustrado nas Figuras 8 e 9, que contemplam os diagramas de dispersão para ambas as modelagens.

Vale ainda ressaltar que ambas as modelagens apresentaram baixo valor do erro médio quadrático ( $RMS^2$ ) sendo de 1,34 para a modelagem anisotrópica e de 1,55 para a isotrópica.

De acordo com os limites estabelecidos por Santos (2007) (Tabela 3), tanto a modelagem isotrópica ( $r=0,28$ ), quanto à anisotrópica ( $r=0,41$ ) apresentaram uma correlação fraca positiva. Embora o modelo anisotrópico tenha apresentado valor próximo à classe moderada positiva, a configuração resultante das duas modelagens não apresentam diferenças significativas, conforme pode ser observado na Figura 10.

<sup>2</sup>O erro RMS (*Root Mean Squared Error*) pode ser definido aqui como sendo a média das diferenças entre os valores estimados pelo processo de *krigagem* e os valores observados na amostra. Essas diferenças individuais, chamadas de resíduos, agrupadas em um único valor de previsão, torna o RMS uma boa medida de precisão.

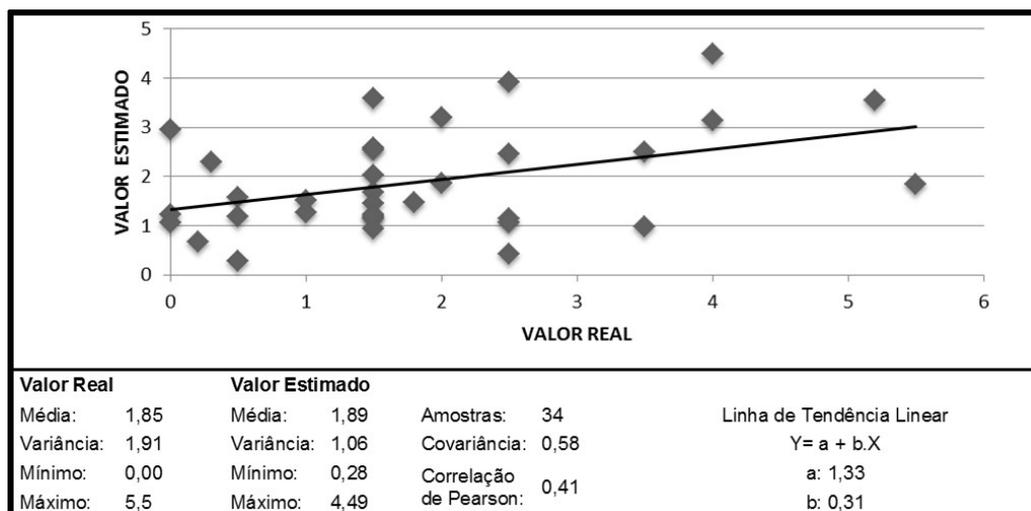


Figura 8: Diagrama de dispersão dos valores reais e estimados na modelagem anisotrópica.

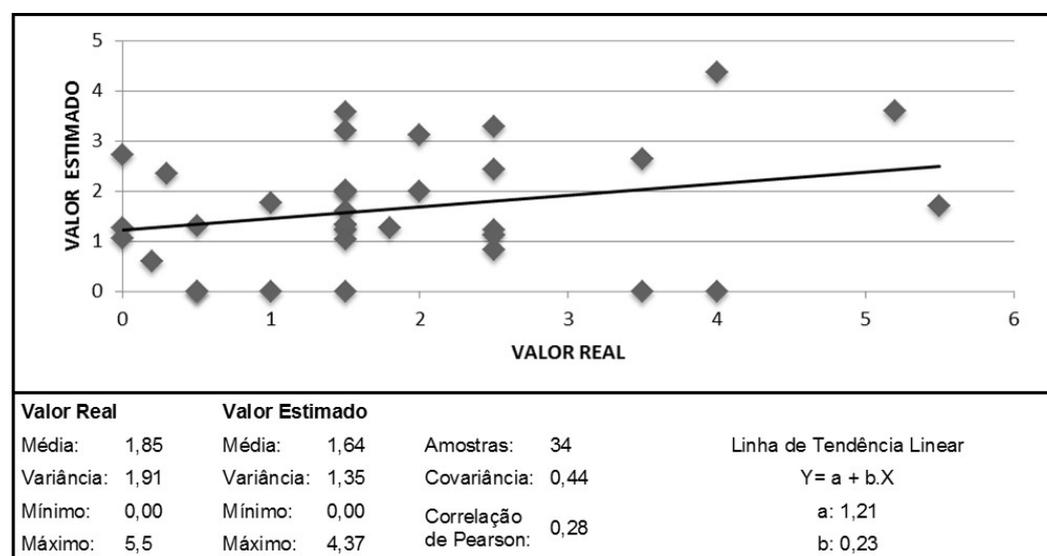


Figura 9: Diagrama de dispersão dos valores reais e estimados na modelagem isotrópica.

Tabela 3: Classificação da correlação linear. Fonte: Santos (2007).

Coefficiente de correlação	Correlação
$r = 1$	Perfeita positiva
$0,8 \leq r < 1$	Forte positiva
$0,5 \leq r < 0,8$	Moderada positiva
$0,1 \leq r < 0,5$	Fraca positiva
$0 \leq r < 0,1$	Ínfima positiva
0	Nula
$-0,1 \leq r < 0$	Ínfima negativa
$-0,5 \leq r < -0,1$	Fraca negativa
$-0,8 \leq r < -0,5$	Moderada negativa
$-1 \leq r < -0,8$	Forte negativa
$r = -1$	Perfeita negativa

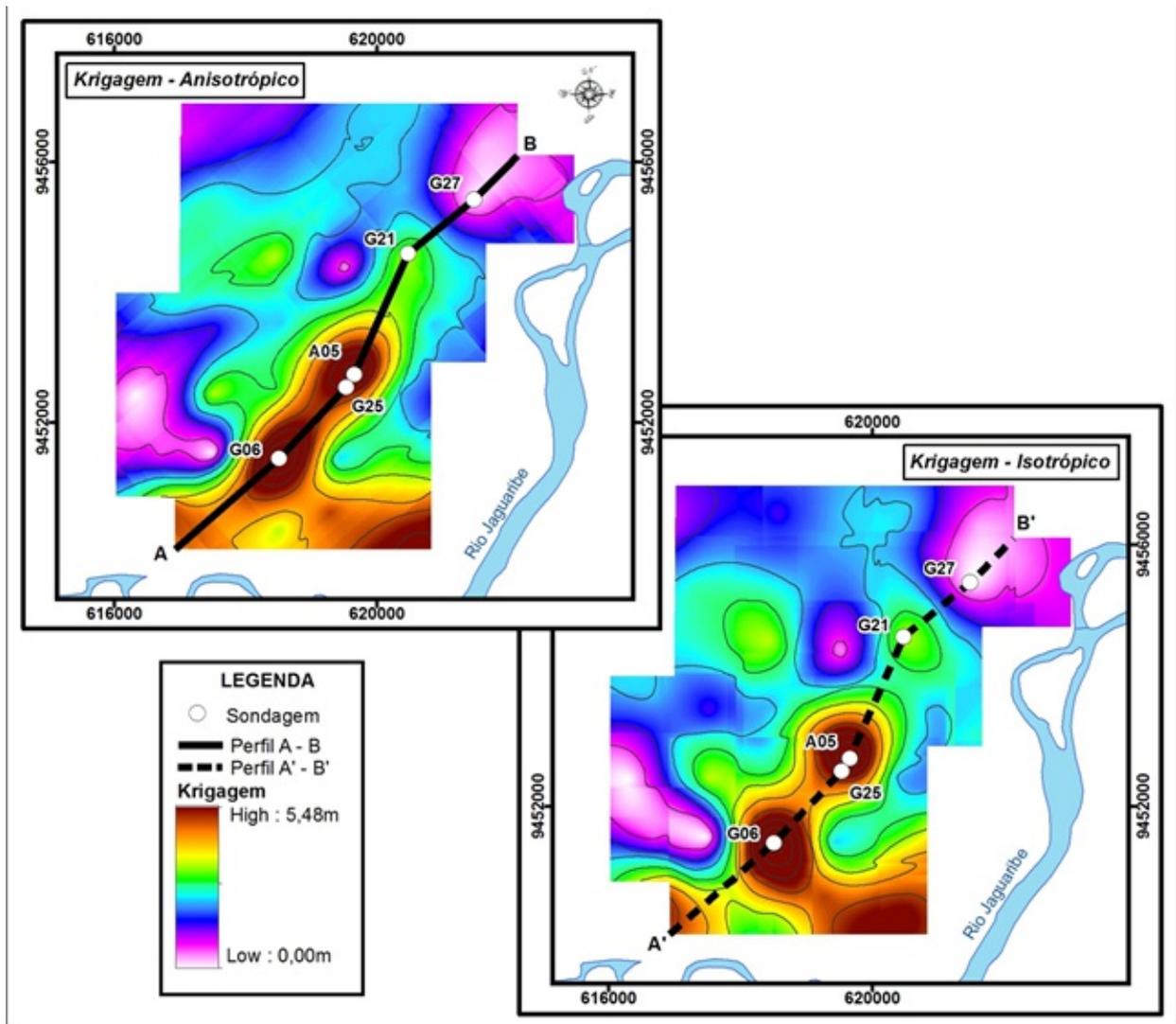


Figura 10: Modelagem resultado do processo de *krigagem* usando modelo anisotrópico e isotrópico.

Entretanto, o valor do coeficiente de correlação entre os dados reais e estimados no modelo anisotrópico ( $r=0,41$ ) ligeiramente superior ao obtido usando o modelo isotrópico ( $r=0,28$ ), bem como do RMS pouco superior ( $rms=1,34$ ) em relação àquele obtido para o modelo isotrópico ( $rms=1,55$ ), pode ser interpretado como um exemplo onde a anisotropia pode não ter sido adequadamente capturada pela análise do conjunto de valores disponíveis. Este problema pode ser resolvido através de uma modelagem a partir de uma malha regular, com menor distância entre os pontos amostrados.

Contudo, em ambas as modelagens as regiões de altos e os baixos de espessura foram igualmente posicionadas. Também é possível observar nas duas modelagens que a maior espessura da reserva lavrável de argila apresenta orientação SW/NE. Entretanto este fenômeno se apresenta de forma mais notória na modelagem anisotrópica, uma vez que esta, através da análise dos variogramas detectou tal tendência (Figura 10).

Sendo assim, a modelagem anisotrópica apresenta uma transição mais suave entre os pontos amostrados, ao passo que na modelagem isotrópica,

devido sua característica de dar o mesmo peso às amostras que estão à mesma distância do ponto, embora em diferentes direções, apresenta transições abruptas entre os pontos amostrados, como pode ser observado nos perfis A-B e A'-B' (Figura 11), traçado no sentido SW/NE da área de estudo, seguindo a região modelada como sendo a de maior espessura da reserva lavrável de argila.

Neste contexto, acredita-se que pela posição do trecho do Rio Jaguaribe, localizado a leste da área de estudo, e orientado SW/NE, esta seja a tendência natural da disposição do depósito de argila em sua planície de inundação, referendando que a modelagem que mais se aproximou da realidade foi a krigagem utilizando o modelo anisotrópico.

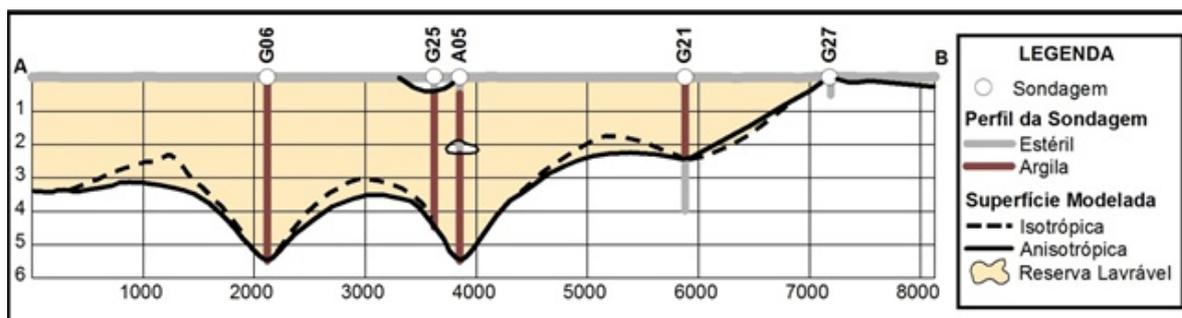


Figura 11: Perfis traçados no sentido SW/NE seguindo a região modelada como sendo a de maior espessura da reserva lavrável de argila.

## 6. CONCLUSÃO

Diante do exposto, se conclui que a solução para a extração desordenada de argila no Polo Ceramista do Baixo Jaguaribe, está na diminuição do número de áreas de extração, concentrando a exploração em áreas onde a argila possua maior espessura.

Vale salientar que este estudo não possui o objetivo de quantificar a reserva de argila na área modelada, uma vez que a amostragem utilizada não é suficiente para capturar completamente o comportamento espacial da variável, mas podemos concluir que a modelagem geoestatística aplicada neste trabalho contribuiu para um melhor entendimento do comportamento espacial da reserva lavrável de argila na área de estudo, colaborando para o ordenamento de sua exploração.

Sendo assim, devido à complexidade da variável, recomenda-se que para um resultado mais refinado seja realizada uma modelagem a partir de

uma malha regular com menor distância entre os pontos amostrados.

## REFERÊNCIAS

- CAVALCANTI, V.M.M.; MOREIRA, M.A.M.; SILVA, C.A.; PERLATTI, F. (2014). A produção de cerâmica vermelha na região do baixo Jaguaribe – CE: lavra, beneficiamento, industrialização e meio ambiente. Fortaleza: Gráfica LCR.
- MOREIRA C.; CARVALHO C.; NUNES I.; QUINTELA M.(2012). Trabalho Prático - Estudo da Condutividade Hidráulica. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- PARAHYBA, R. E. R.; CAVALCANTI, V. M. M; MEDEIROS, M. F. (2000). Projeto TECMO –Tecnologia em cerâmica: Ações para a modernidade e competitividade. Atividades 11, 12, 13, 14, 15. (Relatório preliminar). Fortaleza, 35p.
- SANTOS, C. (2007). Estatística Descritiva - Manual de Auto-aprendizagem. Lisboa, Edições Sílabo.