

Trabalho de Formatura
Curso de Graduação em Geologia

AVALIAÇÃO GEOESTATÍSTICA DE DEPÓSITOS DE ARGILA PARA A
INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA. ESTUDO DE CASO EM CASTILHO E
PRESIDENTE EPITÁCIO, OESTE PAULISTA

Eric Scarpellini Carmargo

Prof. Dr. José Ricardo Sturaro

Rio Claro (SP)
2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

ERIC SCARPELLINI CAMARGO

AVALIAÇÃO GEOESTATÍSTICA DE DEPÓSITOS DE ARGILA
PARA INDÚSTRIA DE CERÂMICA VEMELHA. ESTUDO DE
CASO EM CASTILHO E PRESIDENTE EPITÁCIO, OESTE
PAULISTA

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de
Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio
Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Geólogo.

Rio Claro - SP

2015

ERIC SCARPELLINI CAMARGO

AVALIAÇÃO GEOESTATÍSTICA DE DEPÓSITOS DE ARGILA
PARA INDÚSTRIA DE CERÂMICA VEMELHA. ESTUDO DE
CASO EM CASTILHO E PRESIDENTE EPITÁCIO, OESTE
PAULISTA

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de
Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio
Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Geólogo.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. José Ricardo Sturaro (orientador)

Me. Juan Pedro Pieroni

Dr. Marsis Cabral Junior

Rio Claro, 21 de dezembro de 2015.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

*Dedico este trabalho às mulheres da minha vida, Maria Flora, Carla e Giovanna
e a memória de minha tia Ignez Scarpellini.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor José Ricardo Sturaro pela oportunidade de desenvolver esse trabalho, pela sua orientação e amizade.

Agradeço à Marsis Cabral Jr. por fornecer os dados para que o trabalho pudesse ser desenvolvido.

Agradeço à Professora Gilda Carneiro por ter concedido o espaço de trabalho para confecção e desenvolvimento do trabalho.

Agradeço à Giovanna Mendes por seu trabalho como editora e por seu companheirismo e apoio durante o desenvolvimento desse trabalho. Pelo seu amor.

Aos funcionários do DGA pelas conversas e ajudas.

Aos meus amigos de república (Noea) e ao Professor Washington por continuar alugando a casa para a gente.

Aos meus amigos de turma, de geologia e de Unesp.

A todos os funcionários da Unesp que tornam a vida aqui mais fácil para todos os alunos.

*“Não vos aflijais, nem digais: Que comeremos? Que beberemos? Com que nos vestiremos?
Não vos preocupeis, pois, com o dia de amanhã: o dia de amanhã terá as suas preocupações
próprias. A cada dia basta o seu cuidado.”*

(Mateus, 6:31-34)

RESUMO

Geoestatística é uma ferramenta amplamente utilizada durante a estimativa de reservas e recursos minerais. Essas ferramentas foram desenvolvidas com o intuito de melhorar as técnicas de estimativas utilizadas em minas na África do Sul. Aplicadas durante a modelagem de minas de ouro, que são conhecidas por possuírem alta variabilidade dos teores até mesmo em curtas distâncias, a geoestatística se mostrou uma ferramenta robusta em relação aos outros métodos de estimativa. Utilizando-se de ferramentas geoestatísticas, os seus métodos de investigação foram aplicados na modelagem de depósitos aluviais quaternários nas proximidades do Rio Paraná. Dados sobre espessuras de camadas de argilas (minério) obtidos por tradagem manual, tiveram suas distribuições estatísticas e espaciais analisadas, obtendo-se assim modelos de distribuição espacial. Esses modelos foram aplicados em equações de krigagem, para se estimarem espessuras para pontos não amostrados na área de estudo. Como resultado final, estimativas de volume total de argila disponível foram obtidos e comparados com volumes obtidos em um estudo prévio. Analizando-se as estimativas, foi possível concluir que a aplicação das ferramentas geoestatísticas é altamente recomendada para produção de boas estimativas.

Palavras-chave: Geoestatística. Estimativas Minerais. Reservas Minerais. Depósitos de Argila.
Rio Paraná.

ABSTRACT

Geostatistics has been widely used during the process of estimating ore reserves. Essentially it was developed with the intent of improving ore reserve estimation techniques in real mining settings in South Africa. Applied during the modeling of gold mines, which are known for their high grade variability even for short distances, geostatistics has shown its benefits over other estimation techniques. Making use of geostatistics toolboxes, its investigation tools were applied in the modeling of Quaternary alluvial and terrace deposits in the Paraná River nearby areas. Sediment thickness data, specially of clays, acquired by making use of auger soil sampling were analyzed in terms of their statistical and spatial distributions, generating spatial distribution models. These models were applied to kriging equations, having as outcome estimates for non-sampled spots on the map. The final result was given in terms of volume estimates, which were compared to values produced by the application of different estimate techniques in previous studies. Analyzing the estimates, it was possible to conclude that the use of geostatistics completely fulfill the requirements for producing good estimates.

Keywords: Geostatistics. Ore Estimation. Ore Reserves. Clay Deposits. Paraná River.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama esquemático da geologia dos depósitos de argila nas áreas de estudos.	19
Figura 2 - Representação do modelo de varredura utilizado para coletar pares de amostras num dado conjunto de dados.	22
Figura 3 - Três modelos de curvas dos variogramas teóricos mais comuns utilizados durante o ajuste aos variogramas experimentais.	24
Figura 4 - Mapa da distribuição espacial dos dados do depósito de Campinal.	28
Figura 5 - Histograma dos dados referentes à espessura da camada de argila do tipo 1.	29
Figura 6 - Histograma dos dados referentes à espessura da camada de argila do tipo 2.	29
Figura 7 - Histograma dos dados referentes à espessura da camada de material estéril.	29
Figura 8 - Histograma dos dados referentes à relação estéril/minério.	29
Figura 9 - Superfície variográfica para variável argila to tipo 1 para o depósito de Campinal.	30
Figura 10 - Superfície variográfica para variável argila to tipo 2 para o depósito de Campinal.	30
Figura 11 - Superfície variográfica para variável espessura de material estéril para o depósito de Campinal.	30
Figura 12 - Variograma experimental-teórico para variável argila do tipo 1 no depósito de Campinal.	32
Figura 13 - Variograma experimental-teórico para variável argila do tipo 2 no depósito de Campinal.	33
Figura 14 - Variograma teórico-experimental para variável espessura de material estéril no depósito de Campinal.	34
Figura 15 - Mapa de distribuição espacial dos dados do depósito de Castilho.	35
Figura 16 - Histograma dos dados referentes à espessura da camada de argila do tipo 1.	36
Figura 17 - Histograma dos dados referentes à espessura da camada de argila do tipo 2.	36
Figura 18 - Histograma dos dados referentes à espessura da camada de material estéril.	36
Figura 19 - Histograma dos dados referentes à espessura da camada de material estéril.	36
Figura 20 - Superfície variográfica para variável argila do tipo 1 para o depósito de Castilho.	37
Figura 21 - Superfície variográfica para variável argila do tipo 2 para o depósito de Castilho.	37
Figura 22 - Superfície variográfica para variável estéril para o depósito de Castilho.	37
Figura 23 - Variograma teórico-experimental da variável espessura de argila do tipo 2 para o depósito de Castilho.	38
Figura 24 - Variograma teórico-experimental da variável espessura de argila do tipo 1 para o depósito de Castilho.	39
Figura 25 - Variograma teórico-experimental da variável espessura de material estéril para o depósito de Castilho.	40
Figura 26 - Superfície 3-D representando a distribuição das espessuras de argila do tipo 1 para o depósito de Campinal, em mapa.	51
Figura 27 - Superfície 3-D representando a distribuição das espessuras de argila do tipo 2 para o depósito de Campinal.	51
Figura 28 - Superfície 3-D representando a distribuição das espessuras de argila do tipo 1 para o depósito de Castilho.	52
Figura 29 - Superfície 3-D representando a distribuição das espessuras de argila do tipo 2 para o depósito de Castilho.	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Análise univariada dos dados do depósito de Campinal.....	29
Quadro 2 - Análise de continuidade e anisotropia espacial para os dados de Campinal.....	30
Quadro 3 - Análise univariada dos dados do depósito de Castilho.	36
Quadro 4 - Análise de continuidade e anisotropia espacial para os dados de Castilho.....	37

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1 - Modelo geológico representativo das relações entre resultados da exploração mineral, recursos minerais e reservas minerais.	14
Fluxograma 2 - Etapas da análise espacial dos dados.	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estimativas obtidas para o depósito de Campinal.	43
Tabela 2 - Estimativas obtidas para o depósito de Castilho.	44
Tabela 3 - Cálculo da porcentagem do erro para as estimativas do Depósito de Castilho.....	45
Tabela 4 - Cálculo da porcentagem do erro para as estimativas do depósito de Campinal.....	45
Tabela 5 - Resultados da construção da tabela de relação teor de corte versus volume total, e versus volume médio por bloco. Minério argila do tipo 1 para o depósito de Campinal.....	47
Tabela 6 - Resultados da construção da tabela de relação teor de corte versus volume total, e versus volume médio por bloco. Minério argila do tipo 2 para o depósito de Campinal.....	48
Tabela 7 - Resultados da construção da tabela de relação teor de corte versus volume total, e versus volume médio por bloco. Minério argila do tipo 1 para o depósito de Castilho.....	49
Tabela 8 - Resultados da construção da tabela de relação teor de corte versus volume total, e versus volume médio por bloco. Minério argila do tipo 2 para o depósito de Castilho.	50

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 JUSTIFICATIVA	15
3 OBJETIVOS	16
3.1 Objetivo geral.....	16
3.2 Objetivos específicos.....	16
4 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	17
4.1 Rio Paraná.....	18
4.2 Geologia dos depósitos de argila	19
5 METODOLOGIA.....	21
5.1 Ferramentas geoestatísticas	21
5.1.1 Variáveis regionalizadas	21
5.1.2 Variografia	21
5.1.3 Krigagem Ordinária (K.O.).....	25
5.2 Análise de dados	28
5.2.1 Análise dos dados referentes ao depósito de Campinal	28
5.2.2 Análise dos dados referentes ao depósito de Castilho	35
6 DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	42
7 CONCLUSÕES.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
ANEXO A - Mapa geológico das áreas de estudo e de suas adjacências.....	55
APÊNDICE 1 - Modelo de Blocos Argila do tipo 1 – Depósito de Campinal.	56
APÊNDICE 2 - Modelo de Blocos Argila do tipo 2 – Depósito de Campinal.	57
APÊNDICE 3 - Modelo de Blocos Argila do tipo 1 – Depósito de Castilho.	58
APÊNDICE 4 - Modelo de Blocos Argila do tipo 2 – Depósito de Castilho.	59

1 INTRODUÇÃO

O cálculo de reservas minerais é parte essencial no processo de mineração. Uma vez descoberto um depósito de um dado bem mineral, o cálculo da quantidade desse bem se faz necessária para chegar a valores aproximados do volume disponível, e disso decorrerão todas as outras decisões técnicas e econômicas associadas ao processo de exploração e extração do bem mineral em questão.

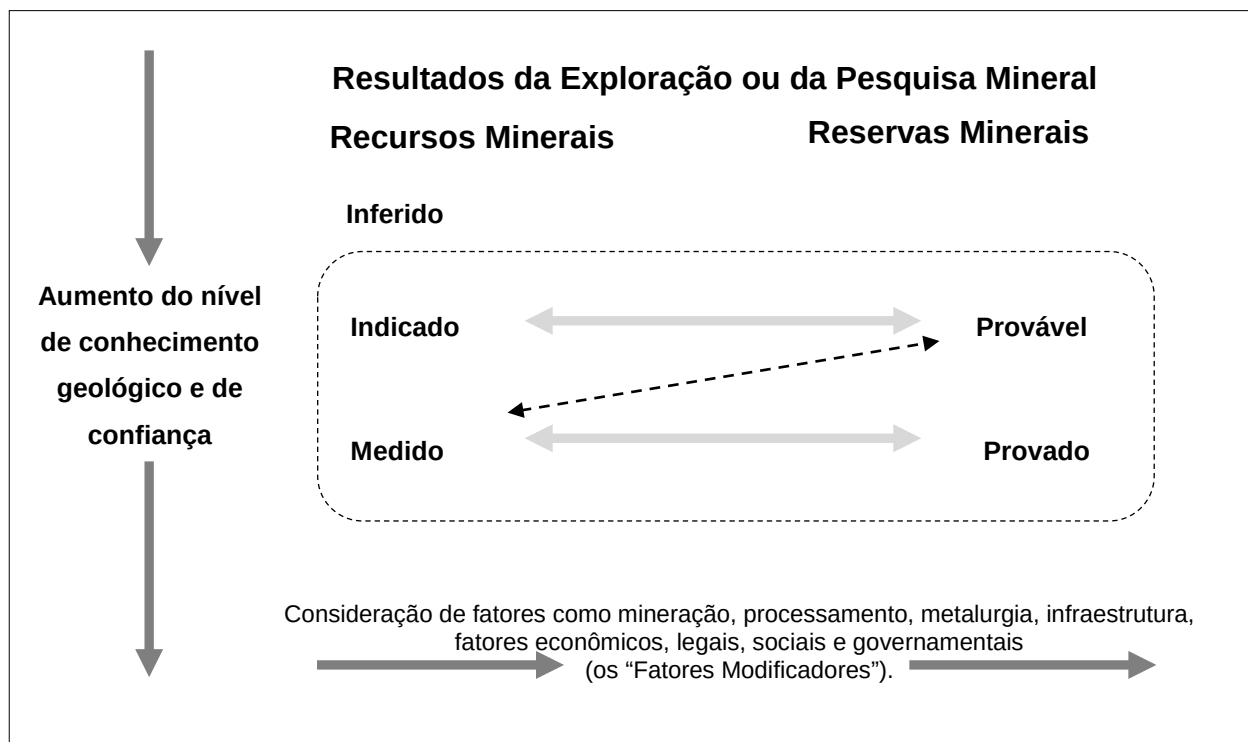
Sabendo-se que o processo de estimativa volumétrica passa obrigatoriamente pela análise de amostras, métodos que venham diminuir os erros nas estimativas de volume são necessários. Existem técnicas especialmente desenhadas para elaboração de modelos de variabilidade de uma ou mais variáveis, por exemplo, espessura, teores e etc., que levem em consideração a distribuição e continuidade espacial de um dado conjunto de dados, e elas são conhecidas como geoestatística.

A realização de estudos geoestatísticos para análise de dados geológicos, leva a uma elevação no grau de conhecimento geológico das áreas sendo estudadas, uma vez que modelos espaciais que descrevem a distribuição dos dados serão gerados. Esse conhecimento aumenta o nível de confiabilidade existente no modelo geológico (Fluxograma 1), o que auxilia na tomada de decisões mais precisas.

Nesse caso em específico, métodos de estimativa geoestatísticos serão utilizados para se estimar o volume de minério em duas reservas de argila para aplicação na indústria de cerâmica vermelha localizadas no noroeste do Estado de São Paulo. Essas reservas foram caracterizadas previamente em um relatório técnico do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) no ano de 2008, e foi elaborada em cima de uma extensa base de dados coletadas entre os anos de 2007-2008, mas com alguns dados tendo sido coletados no início da década de 90.

Os dados constituem-se de espessuras das camadas de argila caracterizadas na área estudo por meio de recuperação de material obtido de furos realizados com auxílio de trados manuais e mecânicos, e consequente classificação macroscópica do material.

Fluxograma 1 - Modelo geológico representativo das relações entre resultados da exploração mineral, recursos minerais e reservas minerais.



Fonte: Modificado de JORC (2012).

2 JUSTIFICATIVA

No relatório técnico elaborado pelo IPT, os dados de espessura das camadas de argila foram utilizados para gerar estimativas de volume de minério e tonelagem do mesmo. Os métodos de estimativa e de interpolação de dados foram realizados utilizando-se a ferramenta *Topo to Raster* do *software ArcGIS*, sem o auxílio de estudo prévio da distribuição espacial das variáveis que seriam estimadas.

No presente trabalho esses mesmos dados serão utilizados para gerarem-se estimativas que possuam o menor erro associado e que respeitem a estrutura espacial intrínseca ao próprio conjunto de dados. Isso implica que se utilizando desses modelos espaciais, efeitos como anisotropia na distribuição de uma dada variável, tal como espessura, possam ser considerados e por fim quando estimativas de volume forem calculadas essas serão melhor representativas do verdadeiro volume de minério existente.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Calcular o volume total das reservas de minério de argila e compará-los aos valores encontrados no relatório técnico do IPT de 2008.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar continuidade espacial dos depósitos de argila utilizando ferramentas geoestatísticas;
- Gerar modelos variográficos para aplicação das equações de krigagem;
- Estimar volume de minério existente e as zonas de maior teor, no caso de maior espessura do mesmo.

4 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

Os depósitos de argila aqui estudados correspondem a sedimentos inconsolidados encontrados nos níveis de terraços alçados resultantes de sedimentação e evolução morfodinâmica em áreas localizadas no alto trecho do Rio Paraná (IPT, 2008). No mapa geológico (Anexo A) é possível notar que ambas as áreas em vermelho, correspondentes aos depósitos de Castilho e de Campinal, encontram-se inseridas na unidade geológica dos terraços intermediários.

O substrato geológico encontrado nas adjacências é composto por rochas basálticas juro-cretáceas correlacionadas ao magmatismo Serra Geral da Bacia do Paraná, e por sequências sedimentares também Cretáceas da Bacia Bauru. Segundo informações do relatório do IPT de 2008, as rochas sedimentares da Bacia Bauru são normalmente encontradas nas áreas de vertentes dos vales e planaltos contínuos da região. Enquanto que as rochas da Formação Serra Geral ocorrem com maior frequência em áreas mais restritas e de maior entalhe nos vales dos rios tributários do rio Paraná (IPT, 2008).

A Bacia Bauru possui duas unidades de ocorrência na área de estudos, e elas são representadas pelo Grupo Caiuá e Grupo Bauru. A Bacia Bauru é composta por sequências sedimentares intracontinentais predominantemente siliciclásticas.

Grupo Caiuá – Essa unidade é representada na região pelas formações Rio Paraná e Santo Anastácio sendo que a primeira é restrita a região do Pontal do Paranapanema sendo circunscrita por arenitos da formação Santo Anastácio, seguindo a calha do rio Paraná a montante e também as suas bacias tributárias (IPT, 2008). Ambas as formações são interpretadas como depósitos originados por sedimentação em ambiente eólico.

Grupo Bauru – Constituem as principais unidades ocorrentes nas proximidades das áreas de pesquisa, as formações Vale do Rio do Peixe, Araçatuba e Presidente Prudente. A formação Vale do Rio do Peixe é constituída principalmente por pacotes de arenitos, e intercalações desses com camadas de siltitos.

A formação Araçatuba ocorre nas proximidades da margem esquerda do Rio Tietê, sendo que seu fácies mais representativo é uma associação de arenitos com quantidades significativas de detritos, mas com predominância de areias finas e siltitos.

A formação Presidente Prudente ocorre nas áreas de interflúvios dos rios Paranapanema, Peixe e Aguapeí, sendo que todos esses são tributários do Rio Paraná. A Fm.

Presidente Prudente é composta predominantemente por arenitos finos a muito finos com intercalações de argilas arenosas.

4.1 Rio Paraná

As áreas de estudo estão inseridas no contexto geomorfológico fluvial da bacia do Alto Paraná que possui extensão de aproximadamente 800 km, tendo início na confluência dos rios Grande e Paranaíba (STEVAUX, 1994). O rio Paraná é um dos três maiores rios em extensão na América do Sul (STEVAUX et al., 2009), sendo que seu canal principal estende-se por aproximadamente 4.000 km (ORFEO; STEVAUX, 2001).

A dinâmica fluvial de cada rio e seu consequente registro sedimentar dependerão de fatores naturais tais como relevo, substrato geológico, e não menos importantes regimes climáticos atuantes (STEVAUX, 1993).

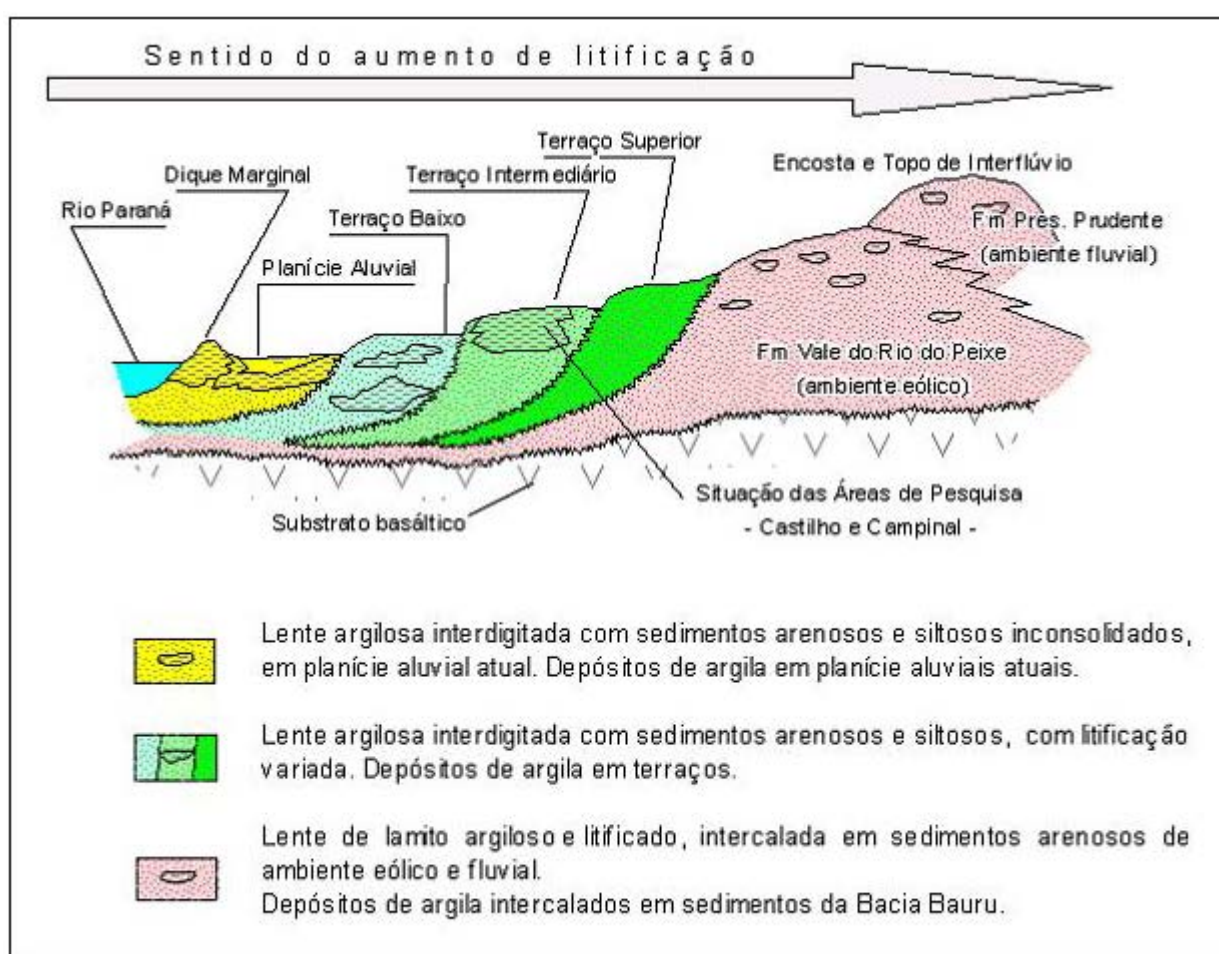
A evolução de um rio e a mudança do seu nível de base devido à escavação causada pelo seu canal no seu próprio vale, conjuntamente com sua dinâmica lateral, faz com que os registros geológicos de elementos tais como bancos de areia, margens, planícies de inundação e etc., formem feições que se encontrarão em níveis topográficos mais elevados em relação ao canal atual. Essas feições elevadas em relação ao rio são conhecidas na literatura como terraços (STEVAUX, 1993).

Ainda segundo Stevaux (1994), o relevo associado as adjacências do Rio Paraná próximo às áreas estudadas consiste de colinas suaves que com seus declives em direção ao próprio curso do rio.

4.2 Geologia dos depósitos de argila

Depósitos de argila na região do Oeste Paulista podem ser encontrados em diferentes unidades geológicas e geomorfológicas ocorrentes na região (Anexo A), tais como em rochas sedimentares dos grupos Caiuá e Bauru, em planícies de inundação e zonas de várzea do rio Paraná e em terraços intermediários deste mesmo rio (IPT, 2008).

Figura 1 - Diagrama esquemático da geologia dos depósitos de argila nas áreas de estudos.



Fonte: IPT (2007).

Os depósitos aqui estudados tratam-se daqueles especificamente associados aos níveis de terraço intermediário (Figura 1). Essas camadas argilosas estão associadas a extensas camadas de areia, e possuem continuidade lateral da ordem de dezenas de metros, podendo atingir espessuras máximas próximas de 10 metros.

De acordo com Nakasu (1998), os terraços intermediários localizam-se nas laterais da calha do Rio Paraná e ocorrem geralmente entre as cotas de 250 a 300 metros. O registro sedimentar dos terraços-intermediários encontra-se classificado como pertencente ao sistema deposicional do Paleoparaná.

A utilização da nomenclatura Paleoparaná se dá pelo fato dos depósitos de nível de terraços intermediários e superiores serem feições geomorfológicas, e também registros sedimentares, resultantes de dinâmica não associada ao fluxo atual do Rio Paraná, mas sim ao seu paleofluxo.

Uma correlação dos terraços aqui apresentados com as unidades Taquaraçu e Fazenda Boa Vista definidas por Stevaux (1993) não foi possível devido a falta de informações mais detalhadas nos dados aqui apresentados, tais como datações, seja por palinologia ou por métodos isotópicos.

Não existindo datações precisas para estabelecimento de uma correlação definitiva, definiremos que os depósitos sedimentares dos níveis de terraço intermediário aqui estudados como tendo idades que variam entre 40.000 e 6.000 anos (Steva, 1993), sendo essas idades as encontradas para depósitos similares em outras áreas do Rio Paraná.

5 METODOLOGIA

5.1 Ferramentas geoestatísticas

5.1.1 Variáveis regionalizadas

São variáveis que apresentam uma distribuição espacialmente estruturada, ou seja, estão distribuídas no espaço e que podem ter suas distribuições descritas por meio de funções probabilísticas conhecidas como funções estocásticas.

Através de funções probabilísticas, a distribuição dos dados pode ser descrita em termos da variância do próprio conjunto de dados, em relação da correlação espacial entre um ponto desse dado conjunto e outros pontos dentro do mesmo, sendo que essas funções são chamadas variograma experimental, semivariograma ou de função de covariância.

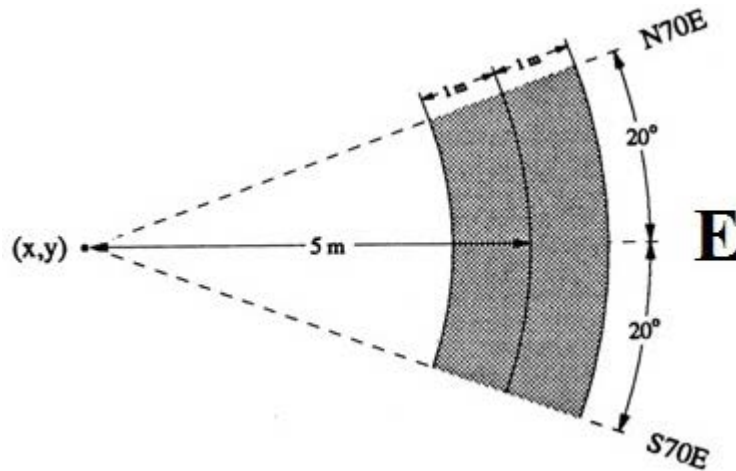
A opção de utilizar um modelo probabilístico ao invés de modelos determinísticos para caracterizar a distribuição espacial dessas variáveis se dá pelo fato delas possuírem distribuições muito complexas, ou pouco determinísticas.

5.1.2 Variografia

O estudo variográfico ou variografia, é o estudo feito num dado conjunto de dados com o intuito de gerar um modelo de distribuição espacial para as variáveis presentes no conjunto. Isso é possível realizando o procedimento de coletar pares do conjunto amostral e calcular-se a diferença ao quadrado desses pares.

No processo de elaboração do modelo variográfico, o espaço amostral e sua distribuição espacial são analisados de maneira que todos os pontos separados por um determinado espaçamento ou *lag* representados pela distância (h), serão coletados e analisados em pares.

Figura 2 - Representação do modelo de varredura utilizado para coletar pares de amostras num dado conjunto de dados.



Fonte: Modificado de Isaaks; Srivastava (1989).

A distância (h) entre dois pontos, dependerá se a malha de amostragem é regular ou não, se sim, o espaçamento entre os pares será o próprio espaçamento da malha.

Quando pares são analisados sem se considerar o ângulo de varredura para agrupá-los, ou seja, somente a distância (h) separando dois pontos é levada em consideração no processo de comparação, o semivariograma experimental gerado é denominado de variograma omnidirecional e quando possui uma direção preferencial é chamado de variograma direcional.

Portanto semivariogramas experimentais são funções que descrevem a distribuição espacial de variáveis em termos da variabilidade das mesmas.

A construção do semivariograma experimental é dada pela equação (1), a seguir:

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N(\mathbf{h})} \sum_{i,j|h_{ij}=\mathbf{h}} (v_i - v_j)^2 \quad (1)$$

Onde h corresponde à distância existente entre um ponto e outro, ou passo. Pode-se imaginar o passo como sendo um vetor de comprimento h onde em sua cauda estará locado o valor V_i e em sua cabeça estará localizado o vetor V_j , como mostrado na Figura 2. Os valores V representam qualquer variável que esteja sendo estudada, por exemplo, teores de algum elemento químico em específico, espessura, permeabilidade, e etc.

Fluxograma 2 - Etapas da análise espacial dos dados.

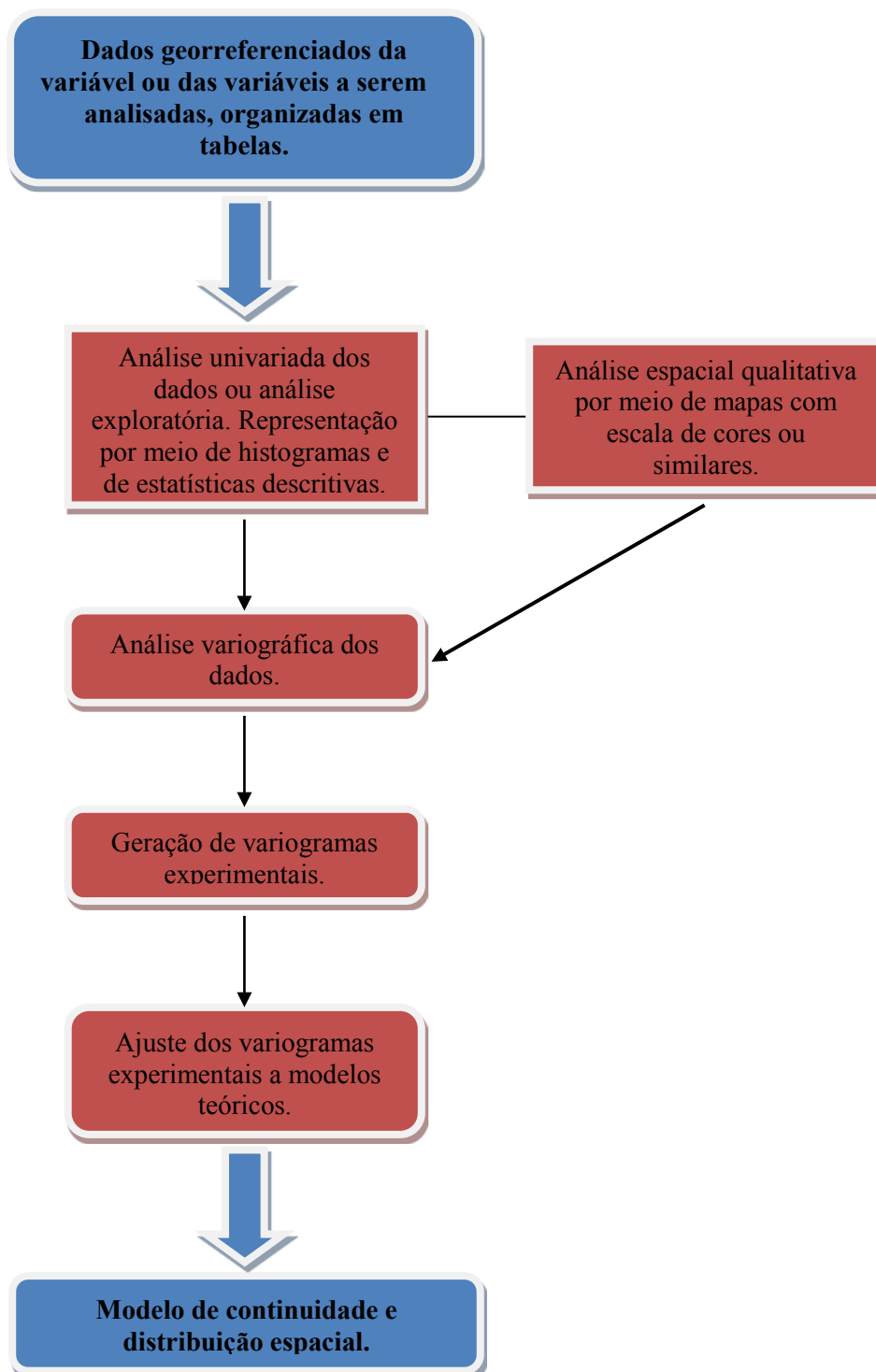
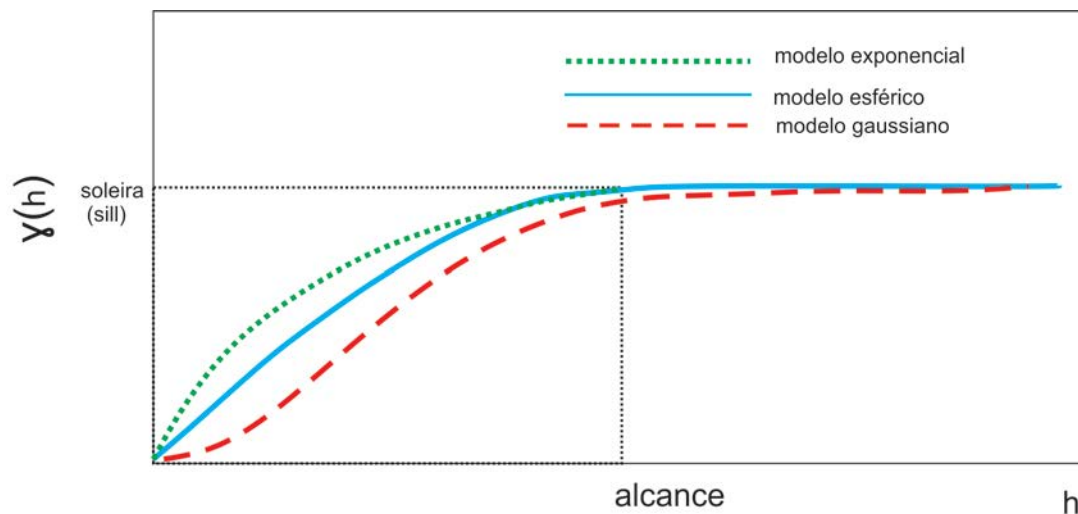


Figura 3 - Três modelos de curvas dos variogramas teóricos mais comuns utilizados durante o ajuste aos variogramas experimentais.



Fonte: Modificado de Isaaks; Srivastava (1989).

Uma vez construído o variograma experimental, o próximo passo no estudo de variografia (Fluxograma 2) consiste em ajustar-se um modelo teórico de curva à curva experimental. Exemplos dessas curvas podem ser vistos na Figura 3, que apresenta os três modelos teóricos mais utilizados durante a construção de um modelo de distribuição espacial.

As equações que descrevem cada uma dessas diferentes curvas do modelo exponencial, esférico e gaussiano são utilizadas para calcular-se os valores de covariância que serão inseridos nas matrizes da krigagem.

5.1.3 Krigagem Ordinária (K.O.)

É um método de interpolação linear que aplica um modelo de distribuição espacial representado pelo semivariograma teórico-experimental em seus cálculos. Segundo Isaaks e Srivastava (1989), a krigagem ordinária na língua inglesa é descrita pela sigla *B.L.U.E.*, que segundo os autores significa “*Best linear unbiased estimator*”, ou em português “melhor estimador linear não enviesado”.

Ainda segundo Isaaks e Srivastava (1989), “A krigagem ordinária é “linear” porque suas estimativas são geradas por pesos combinados linearmente dos dados existentes; ela também é “não enviesada”, pois tenta gerar um resíduo médio m_R ou erro, igual a zero; a K.O. é o melhor estimador pois tem como objetivo minimizar o σ_R^2 , ou seja, a variância dos erros” (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

Além de obedecer a um modelo estocástico de distribuição espacial, a diferença da krigagem para outros métodos de interpolação é que as incertezas associadas ao próprio processo de gerarem-se estimativas podem ser acessadas. Isso faz com que os resíduos, ou seja, os erros possam ser analisados de maneira, a saber, o grau de incerteza existente nas estimativas.

Um problema associado ao fato do estimador ser o menos enviesado é que as estimativas obtidas por meio da krigagem tendem a ser suavizadas, sendo que os valores estimados tenderão sempre para a média.

De acordo com Bentley (2014), “combinando-se: 1. A hipótese intrínseca (quase estacionariedade de segunda ordem), 2. O critério de mínima variância das estimativas e 3. o critério de não viés, e teremos as equações de krigagem”:

$$\begin{pmatrix} \tilde{C}_{11} & \tilde{C}_{12} & \tilde{C}_{13} & \cdots & \tilde{C}_{1n} & 1 \\ \tilde{C}_{21} & \tilde{C}_{22} & \tilde{C}_{23} & \cdots & \tilde{C}_{2n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \tilde{C}_{n1} & \tilde{C}_{n2} & \tilde{C}_{n3} & \cdots & \tilde{C}_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix} \bullet \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ \vdots \\ w_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{C}_{10} \\ \tilde{C}_{20} \\ \vdots \\ \tilde{C}_{n0} \\ 1 \end{pmatrix}$$

$\tilde{C}_{ij}$ - 1. “Covariância entre dois pontos i e j . Os pontos de 1 à n são os pontos conhecidos ou amostrados e o ponto 0 é o ponto a ser estimado. Sabendo-se a localização dos pontos amostrados e a localização dos pontos a serem estimados, nós podemos usar a covariância

parametrizada ou o modelo fornecido pelo semivariograma (variograma) para calcular o valor da covariância entre todos os diferentes pontos” (BENTLEY, 2014).

w_i - 2. “Peso aplicado ao *enésimo* ponto medido, ou valor conhecido do conjunto de dados para se estimar um ponto desconhecido” (BENTLEY, 2014).

μ - 3. “Multiplicador de Lagrange. Este parâmetro é utilizado para garantir a condição de não viés” (BENTLEY, 2014).

Ou seja, a somatória de todos os pesos w_i deve ser igual a 1. Tal como na equação (2), a seguir:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (2)$$

A matriz das equações da krigagem ordinária pode ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{matrix} n+1 \text{ fileiras} \\ \begin{pmatrix} \tilde{C}_{11} & \cdots & \tilde{C}_{1n} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \tilde{C}_{n1} & \cdots & \tilde{C}_{nn} & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix} \bullet \begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{C}_{10} \\ \vdots \\ \tilde{C}_{n0} \\ 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

$\mathbf{C} \qquad \mathbf{w} \qquad \mathbf{D}$

Para resolvermos esse sistema de matrizes devem-se realizar as seguintes operações:

$$\begin{aligned} \mathbf{C} \cdot \mathbf{w} &= \mathbf{D} \\ \mathbf{C}^{-1} \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{w} &= \mathbf{D} \cdot \mathbf{C}^{-1} \\ \mathbf{I} \cdot \mathbf{w} &= \mathbf{D} \cdot \mathbf{C}^{-1} \\ \mathbf{w} &= \mathbf{C}^{-1} \cdot \mathbf{D} \end{aligned}$$

Quando a matriz $\mathbf{w}$ é solucionada, e cada peso w_i para cada valor conhecido v_i do conjunto de dados são encontrados, então podemos estimar o valor $\hat{V}$ num ponto não conhecido. Isto é feito resolvendo-se a equação (3), a seguir:

$$\hat{v} = \sum_{i=1}^n w_i v_i = w^t v = \begin{pmatrix} w_1 & w_2 & \cdots & w_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

Onde:

$\hat{v}$ = valor desconhecido a ser estimado

w_i = enésimo peso e

v_i = enésimo valor conhecido do conjunto de dados

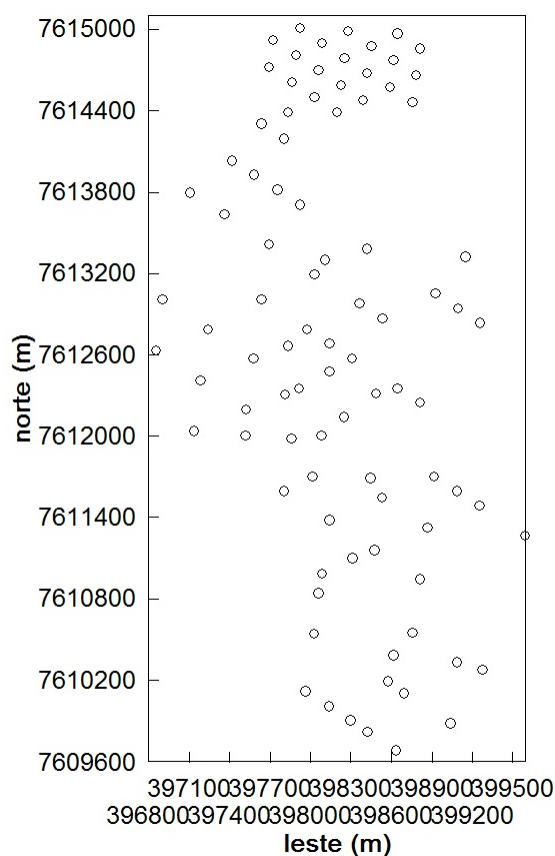
5.2 Análise de dados

5.2.1 Análise dos dados referentes ao depósito de Campinal

Os dados referentes ao depósito de Campinal (Figura 4) são compostos por informações de espessura de 90 furos de sondagem a trado. Os histogramas aqui apresentados correspondem às espessuras das camadas de argila tipo 1, argila tipo 2, e areia, que corresponde à camada estéril, e relação estéril/minério (Figura 8). Dessas variáveis, somente as espessuras de argila tipo 1, argila tipo 2 e estéril foram utilizadas durante o estudo variográfico.

Alguns dados de sondagem foram excluídos no começo do estudo por não conterem informação sobre as espessuras das variáveis escolhidas.

Figura 4 - Mapa da distribuição espacial dos dados do depósito de Campinal.



Quadro 1 - Análise univariada dos dados do depósito de Campinal.

Figura 5 - Histograma dos dados referentes à espessura da camada de argila do tipo 1. Média: 0,978; variância: 0,983; máximo: 6,3; quartil-superior: 1,5; mediana: 0,65; quartil inferior: 0,35; mínimo: 0. O histograma possui uma distribuição lognormal ou assimétrica positiva.

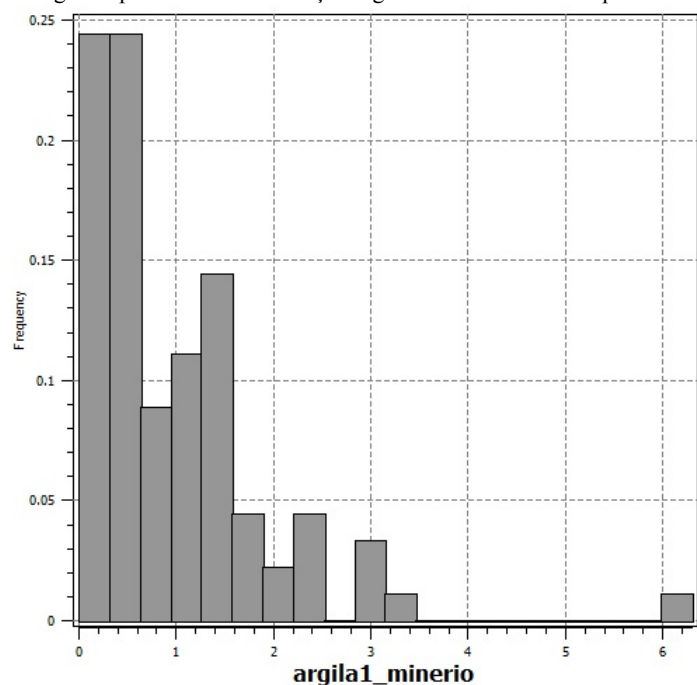


Figura 6 - Histograma dos dados referentes à espessura da camada de argila do tipo 2. Média: 1,3; variância: 1,628; máximo: 6,7; quartil-superior: 2; mediana: 1; quartil inferior: 0,2; mínimo: 0. O histograma possui uma distribuição lognormal.

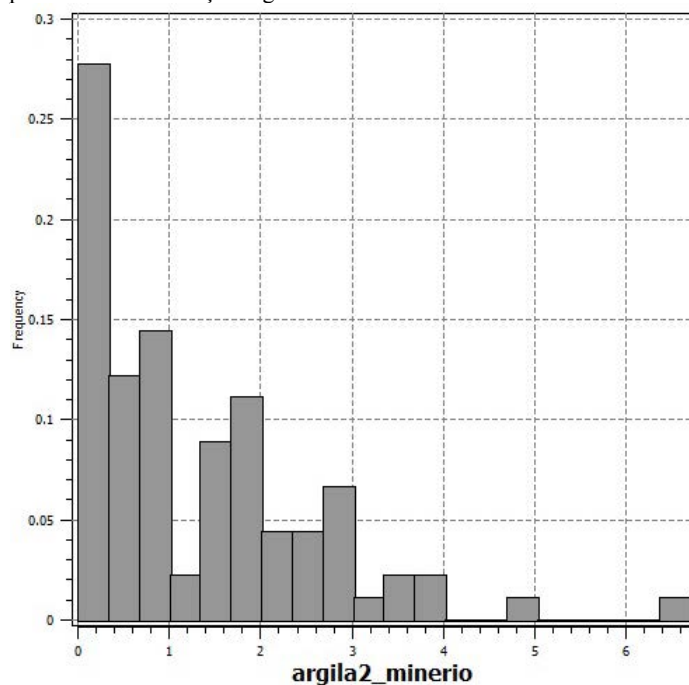


Figura 7 - Histograma dos dados referentes à espessura da camada de material estéril. Média: 1,99; variância: 0,96; máximo: 4,3; quartil-superior: 2,5; mediana: 2; quartil inferior: 1,4; mínimo: 0. Número de dados: 92. O histograma possui uma distribuição normal.

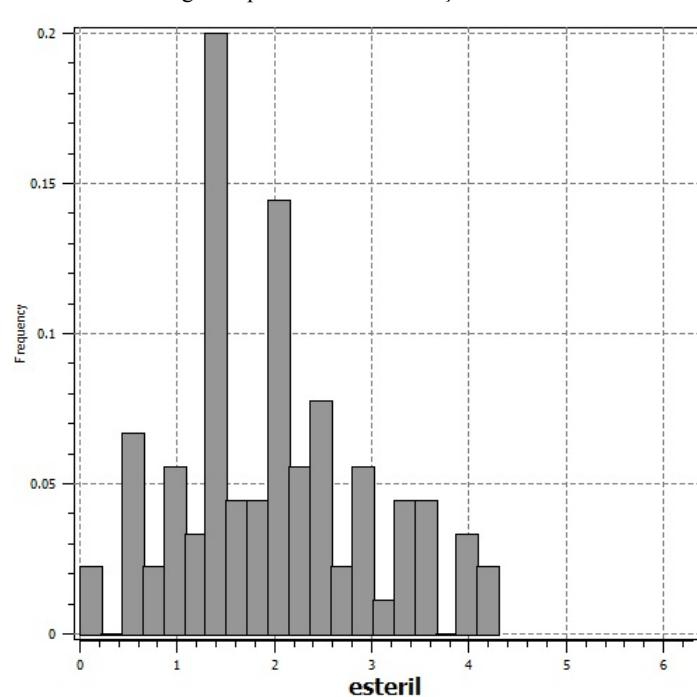
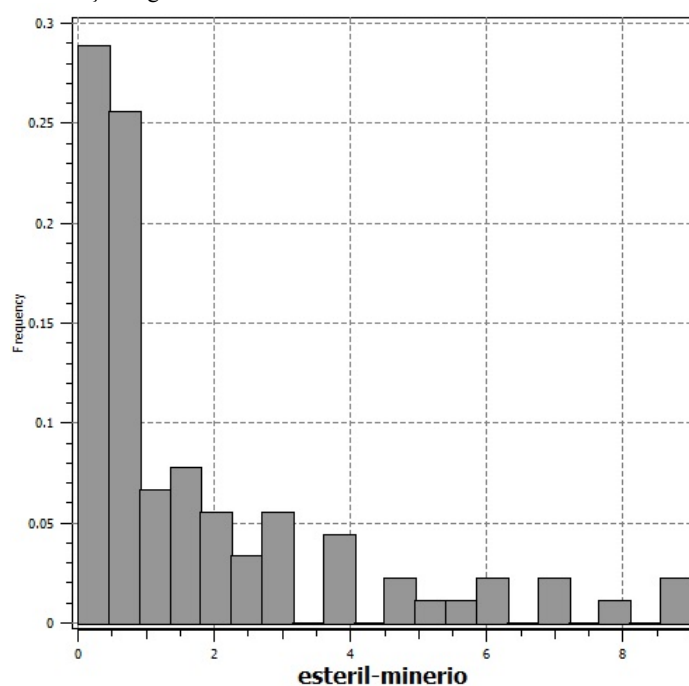
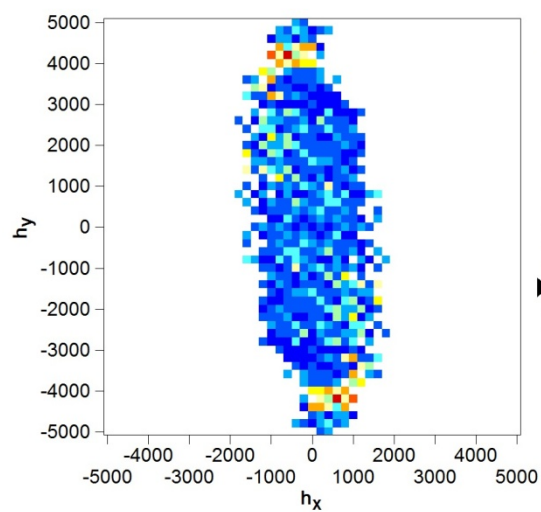
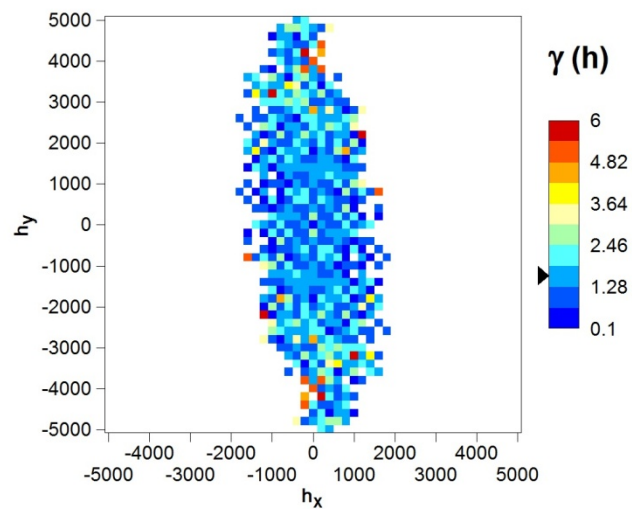
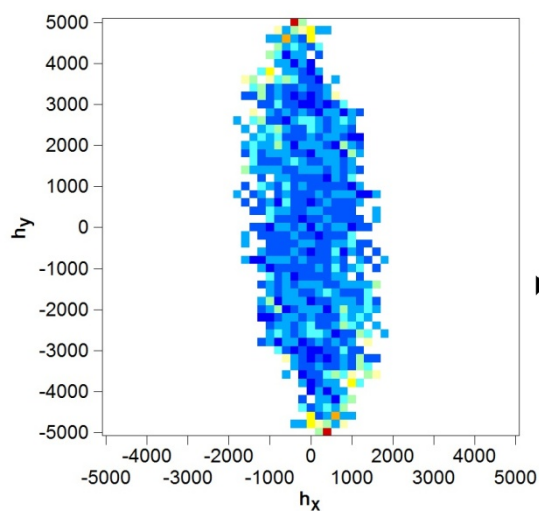


Figura 8 - Histograma dos dados referentes à relação estéril/minério. Média: 1,762; variância: 4,44; máximo: 9; quartil-superior: 2,15; mediana: 0,72; quartil inferior: 0,43; mínimo: 0. O histograma possui uma distribuição lognormal.



Quadro 2 - Análise de continuidade e anisotropia espacial para os dados de Campinal.**Figura 9 - Superfície variográfica para variável argila do tipo 1 para o depósito de Campinal.****Figura 10 - Superfície variográfica para variável argila do tipo 2 para o depósito de Campinal.****Figura 11 - Superfície variográfica para variável espessura de material estéril para o depósito de Campinal.**

Nesse conjunto de imagens é possível analisar a anisotropia existente na distribuição espacial das variáveis sendo estudadas. Na Figura 9, é possível enxergar como está distribuída espacialmente a variância dos dados de espessura da argila do tipo 1, que é apresentada na Figura 5 junto ao histograma dessa mesma variável.

Nesse mapa da superfície variográfica da variável argila tipo 1 para o depósito de Campinal, é possível constatar uma forte anisotropia na direção NW-SE. Essa mesma direção preferencial se repete nas superfícies variográficas da variável argila do tipo 2 e estéril, mostradas nas Figuras 10 e 11.

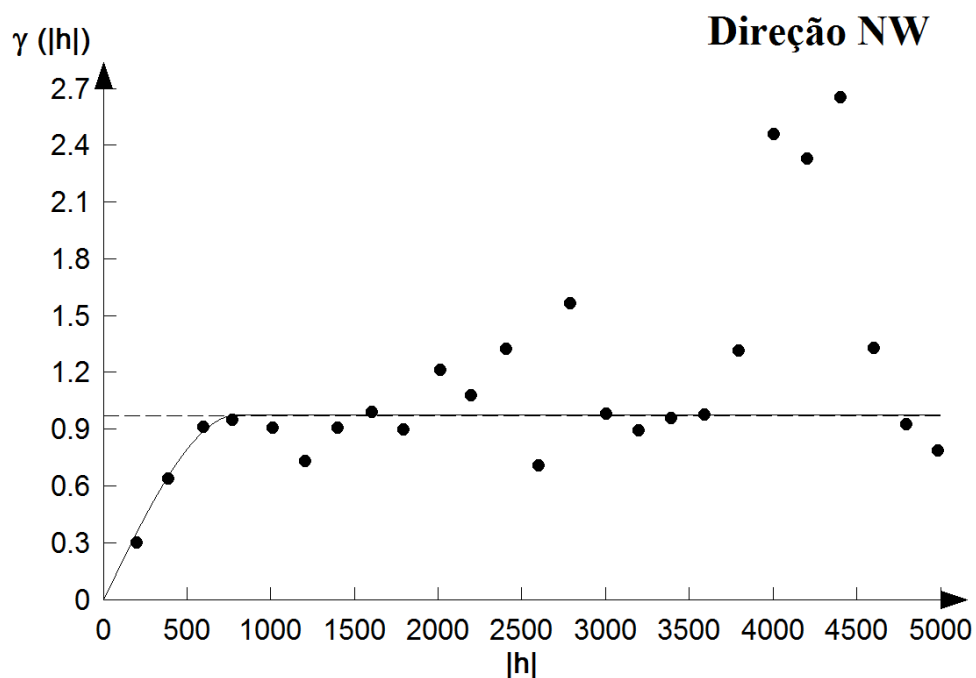
Os histogramas das duas variáveis que são consideradas minério na área de estudo, as espessuras de argila do tipo 1 e do tipo 2, como é possível ver nas Figuras 5 e 6 respectivamente, apresentam distribuições de frequência assimétrica positiva ou lognormal positiva. Esse tipo de distribuição é caracterizado pela ocorrência de valores naturais positivos, no caso das nossas variáveis, valores de espessura, onde os valores menores, por exemplo, as menores espessuras, ocorrem com mais frequência do que as espessuras maiores (CLARK; HARPER, 2000).

A variável estéril possui distribuição normal em seu histograma (Figura 7), o que torna sua análise geoestatística algo menos complicado do que a análise das variáveis espessuras de argilas na área de estudos.

Quando identificada a continuidade espacial na direção NW-SE, foram executados variogramas direcionais segundo azimuth 135, gerando-se assim variogramas experimentais direcionais segundo essa direção para as três variáveis. A continuidade espacial existente nessa direção também foi capturada pelos variogramas experimentais (Figuras 12, 13 e 14), confirmando a anisotropia espacial.

Para cada uma das variáveis, espessuras de argila do tipo 1, argila do tipo 2 e de material estéril, foram executadas varreduras variográficas segundo os azimutes N45, N90, N135, e N180. Gerando-se variogramas experimentais nessas direções, mais uma vez constata-se que a direção de maior continuidade espacial é NW-SE, em relação às outras direções estudadas.

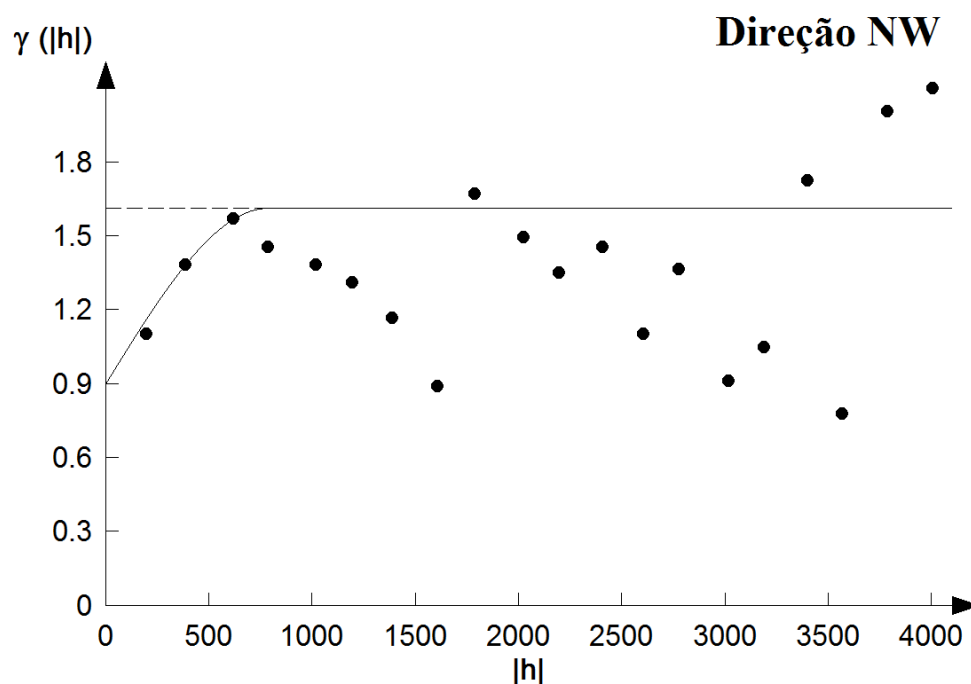
Figura 12 - Variograma experimental-teórico para variável argila do tipo 1 no depósito de Campinal.



Variograma experimental dos dados de espessura das camadas de argila do tipo 1 na direção N315 (NW)	
Espaçamento/Passo (lag)	200 metros
Tolerância no passo	100 metros
Número de passos	25
Direção	N315
Tolerância angular	45°
Largura da banda (bandwidth)	--

Variograma teórico dos dados de espessura das camadas de argila do tipo 1 na direção NW	
Efeito pepita	0
Direção	N315
Modelo teórico	Esférico
Alcance	800 m
Contribuição do patamar (sill)	0,98
Anisotropia	1,0

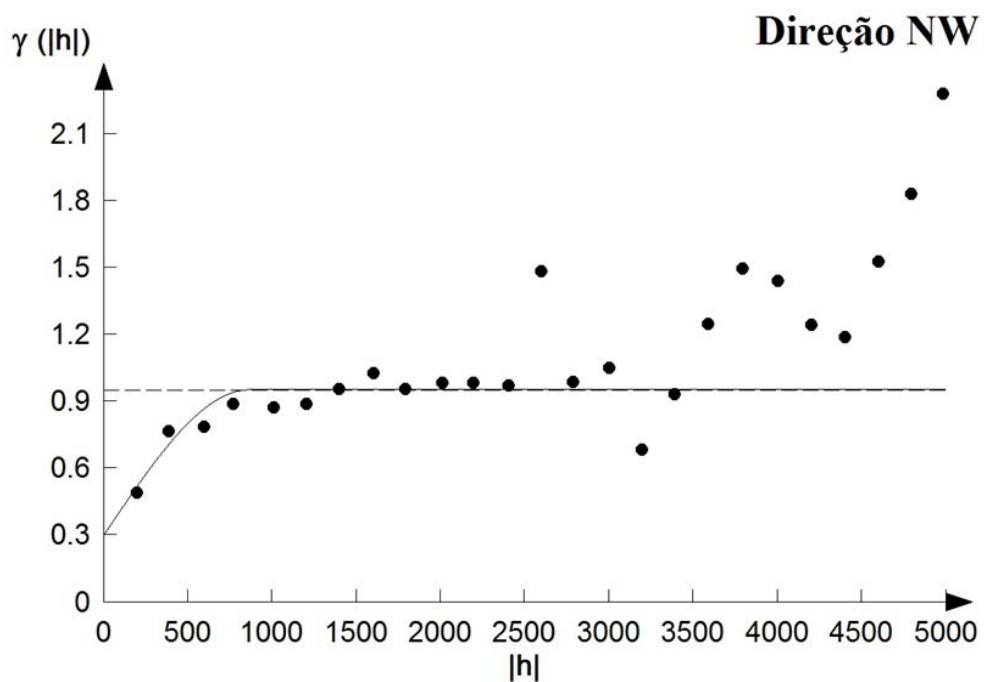
Figura 13 - Variograma experimental-teórico para variável argila do tipo 2 no depósito de Campinal.



Variograma experimental dos dados de espessura das camadas de argila do tipo 2 (Campinal)	
Espaçamento/Passo (lag)	200 metros
Tolerância no passo	100 metros
Número de passos	25
Direção	N315
Tolerância angular	22.5°
Largura da banda (bandwidth)	--

Variograma teórico dos dados de espessura das camadas de argila do tipo 2 (Campinal)	
Efeito pepita	0,9
Direção	N315
Modelo teórico	Esférico
Alcance	785 m
Contribuição do patamar (sill)	0,715
Anisotropia	1,0

Figura 14 - Variograma teórico-experimental para variável espessura de material estéril no depósito de Campinal.



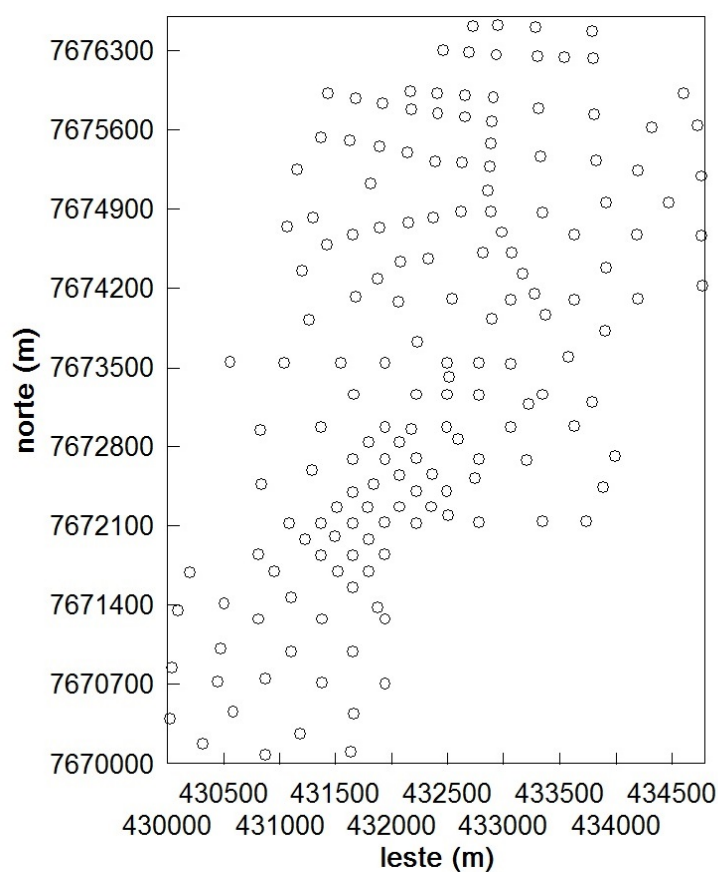
Variograma experimental dos dados de espessura das camadas material estéril para o depósito de Campinal	
Espaçamento/Passo (lag)	200 metros
Tolerância no passo	100 metros
Número de passos	25
Direção	N315
Tolerância angular	45°
Largura da banda (bandwidth)	--

Variograma teórico da camada de material estéril	
Efeito pepita	0,3
Direção	N315
Modelo teórico	Esférico
Alcance	866 m
Contribuição do patamar (sill)	0,655
Anisotropia	1,0

5.2.2 Análise dos dados referentes ao depósito de Castilho

Os dados referentes ao depósito de Castilho (Figura 15) são compostos por informações de espessura de 167 furos de sondagem a trado. Os histogramas aqui apresentados correspondem às espessuras das camadas de argila tipo 1, argila tipo 2, e areia, que corresponde à camada estéril, e relação estéril/minério. Dessas variáveis, somente as espessuras de argila tipo 1, argila tipo 2 e estéril foram utilizadas durante o estudo variográfico.

Figura 15 - Mapa de distribuição espacial dos dados do depósito de Castilho.



Quadro 3 - Análise univariada dos dados do depósito de Castilho.

Figura 16 - Histograma dos dados referentes à espessura da camada de argila do tipo 1. Média: 0,891916; variância: 1,06227; máximo: 4,5; quartil-superior: 1,5; mediana: 0,5; quartil inferior: 0; mínimo: 0. O histograma possui uma distribuição lognormal ou assimétrica positiva.

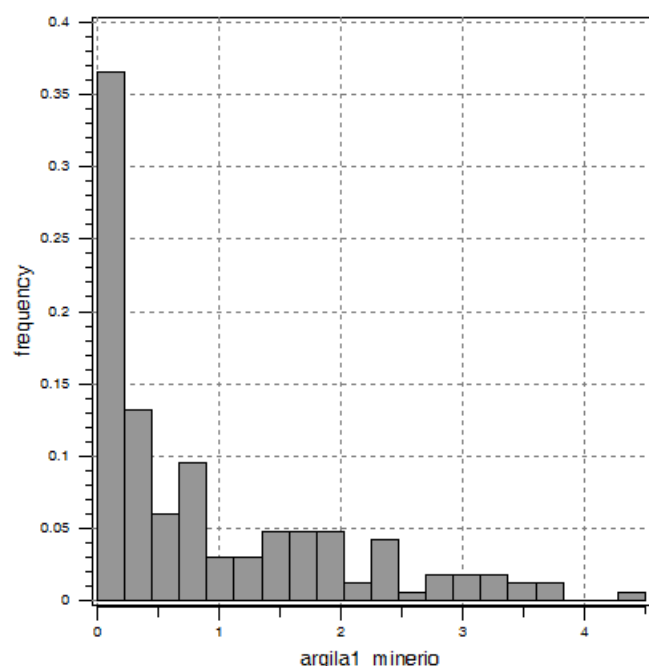


Figura 17 - Histograma dos dados referentes à espessura da camada de argila do tipo 2. Média: 2,49802; variância: 4,27207; máximo: 10,1; quartil-superior: 3,8; mediana: 2; quartil inferior: 1; mínimo: 0. O histograma possui uma distribuição lognormal.

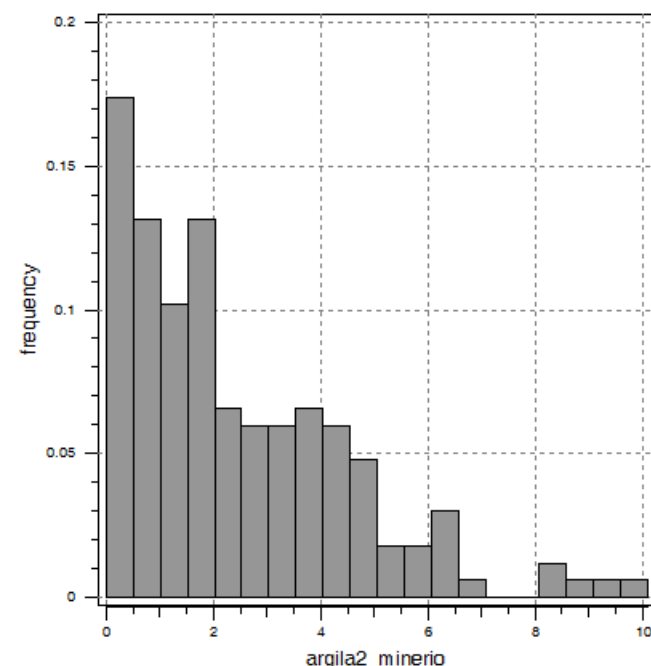


Figura 18 - Histograma dos dados referentes à espessura da camada de material estéril. Média: 0,761138; variância: 0,651507; máximo: 4,3; quartil-superior: 1; mediana: 0,5; quartil inferior: 0,2; mínimo: 0. Número de dados: 92. O histograma possui uma distribuição lognormal.

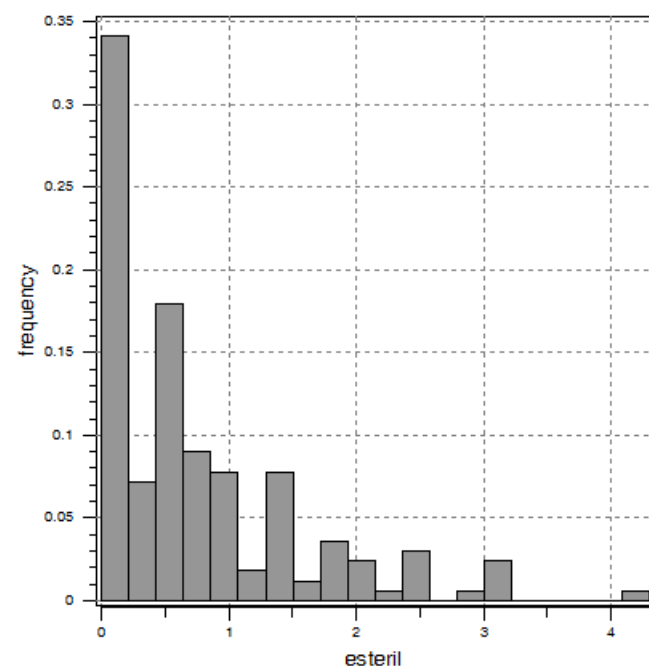
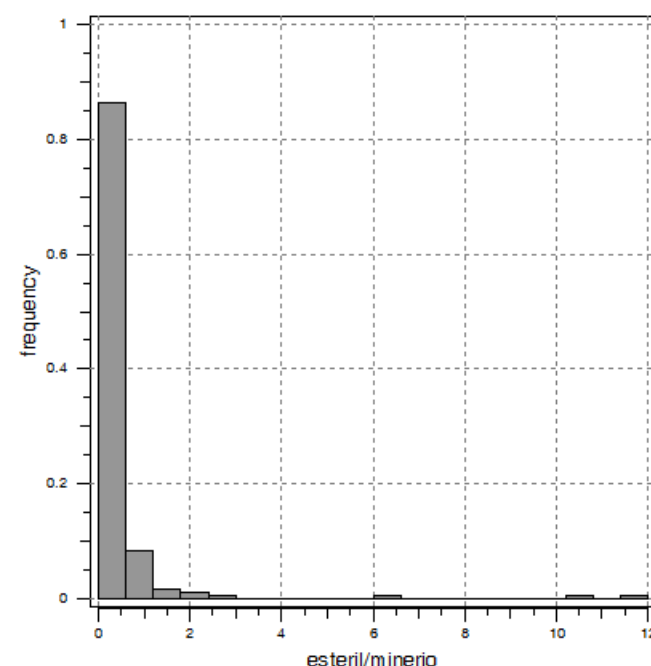


Figura 19 - Histograma dos dados referentes à espessura da camada de material estéril. Média: 0,450958; variância: 1,79817; máximo: 12; quartil-superior: 0,44; mediana: 0,16; quartil inferior: 0,05; mínimo: 0. O histograma possui uma distribuição lognormal.



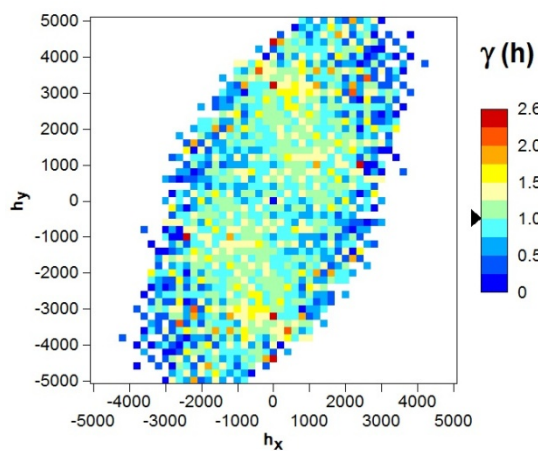
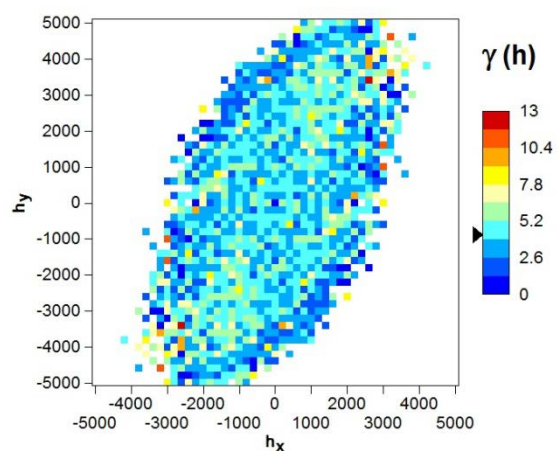
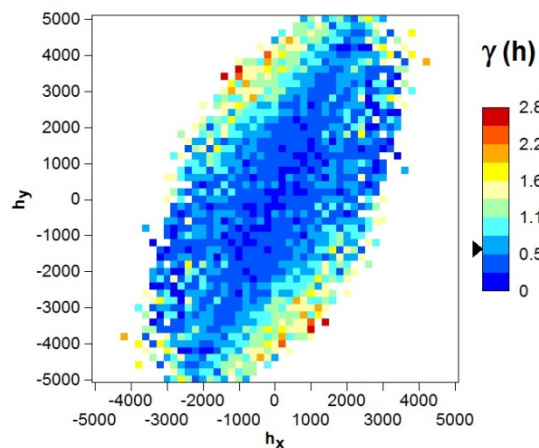
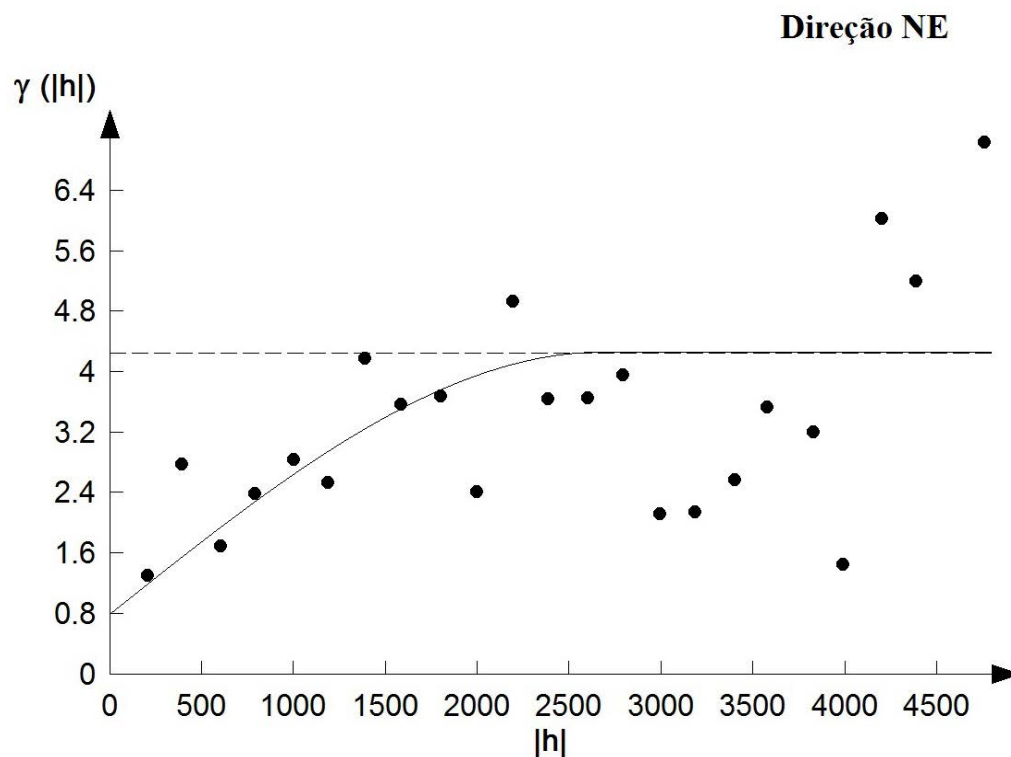
Quadro 4 - Análise de continuidade e anisotropia espacial para os dados de Castilho.**Figura 20** - Superfície variográfica para variável argila do tipo 1 para o depósito de Castilho.**Figura 21** - Superfície variográfica para variável argila do tipo 2 para o depósito de Castilho.**Figura 22** - Superfície variográfica para variável estéril para o depósito de Castilho.

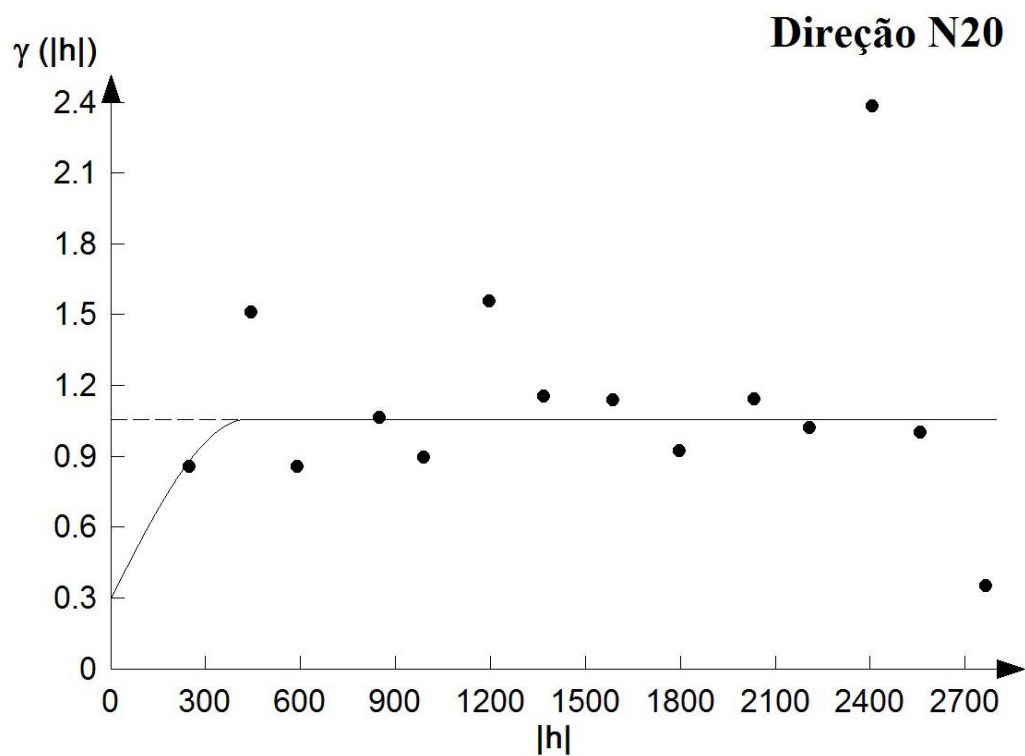
Figura 23 - Variograma teórico-experimental da variável espessura de argila do tipo 2 para o depósito de Castilho.



Variograma experimental dos dados de espessura de argila tipo 2 segundo orientação NE	
Espaçamento/Passo (lag)	200 metros
Tolerância no passo	100 metros
Número de passos	25
Direção	N45
Tolerância angular	22.5°
Largura da banda (bandwidth)	50 m

Variograma teórico dos dados de espessura de argila tipo 2 segundo orientação NE	
Efeito pepita	0,8
Direção	N45
Modelo teórico	Esférico
Alcance	2200 m
Contribuição do patamar (sill)	3,47
Anisotropia	1,0

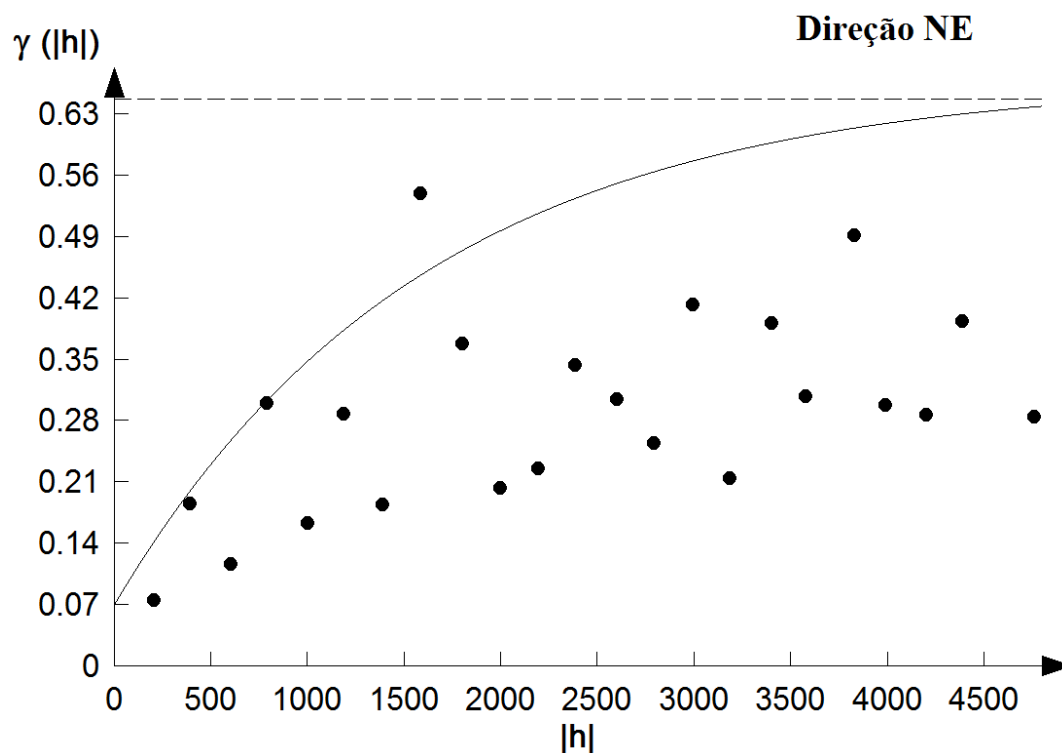
Figura 24 - Variograma teórico-experimental da variável espessura de argila do tipo 1 para o depósito de Castilho.



Variograma experimental dos dados de espessura de argila tipo 1 segundo orientação N20	
Espaçamento/Passo (lag)	200 metros
Tolerância no passo	100 metros
Número de passos	25
Direção	N20
Tolerância angular	22.5°
Largura da banda (bandwidth)	50 m

Variograma teórico dos dados de espessura de argila tipo 1 segundo orientação N20	
Efeito pepita	0,3
Direção	N20
Modelo teórico	Esférico
Alcance	430 m
Contribuição do patamar (sill)	0,76
Anisotropia	1,0

Figura 25 - Variograma teórico-experimental da variável espessura de material estéril para o depósito de Castilho.



Variograma experimental dos dados de espessura das camadas de material estéril segundo orientação NE	
Espaçamento/Passo (lag)	200 metros
Tolerância no passo	100 metros
Número de passos	25
Direção	N45
Tolerância angular	22.5°
Largura da banda (bandwidth)	50 m

Variograma teórico dos dados de espessura de material estéril segundo orientação SE	
Efeito pepita	0,07
Direção	N45
Modelo teórico	Exponencial
Alcance	4800 m
Contribuição do patamar (sill)	0,6
Anisotropia	1,0

Assim como as variáveis espessuras de argila do tipo 1 e tipo 2 para o depósito de Campinal, essas variáveis para o depósito de Castilho também apresentam distribuição assimétrica positiva ou lognormal positiva em seus histogramas (Figuras 16, 17, 18 e 19 no Quadro 3), e como já descrito anteriormente representam uma maior ocorrência de espessuras menores das camadas de minério em relação às espessuras maiores.

Analisando-se as imagens acima, pode-se constatar uma anisotropia espacial evidente segundo direção NE-SW.

A malha de amostragem utilizada durante a coleta de dados tem uma direção preferencial também NE-SW, causando assim uma tendência na orientação geral de menor variância, como pode ser percebido nos mapas de anisotropia dos dados de Castilho (Figuras 20, 21 e 22 no Quadro 4).

Identificando-se a anisotropia NE-SW no conjunto de dados, foram executados variogramas experimentais para os azimutes, N45, N90, N135 e N180 e seus azimutes respectivos azimutes suplementares N225, N270, e N315.

Os variogramas experimentais resultantes evidenciam a direção preferencial NE-SW (Figuras 23 e 25) na continuidade espacial das espessuras dos dois tipos de minério, espessura de argila do tipo 1 e do tipo 2, essa direção também é a direção de maior continuidade espacial para a variável espessura de material estéril. Apesar do possível viés causado pela orientação da malha, devido à evidente continuidade espacial de direção noroeste captada pelos variogramas, pode-se assumir que a estruturação espacial das variáveis de espessura é causada principalmente pela geometria dos depósitos sedimentares.

6 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Como resultado final do estudo de distribuição espacial dos dados, foram geradas estimativas utilizando-se de krigagem ordinária. Para aplicação do método de interpolação para ambos os depósitos foram criados blocos regulares de $100 \times 100 \text{ m}^2$ com diferentes números de células em x e y, cobrindo assim toda área de estudos dos dois depósitos.

Para o depósito de Castilho foi criado um modelo de blocos com 48 células em x e 68 células em y, totalizando 3.264 blocos de $100 \times 100 \text{ m}$ cada. E para o modelo de blocos do depósito de Campinal foi criado um modelo com 28 células em x e 54 células em y, totalizando 1.512 blocos de $100 \times 100 \text{ m}^2$.

Os modelos de blocos estão georreferenciados na origem das coordenadas das malhas de amostragem de cada depósito.

Todos os blocos que não possuíam valores amostrais foram estimados por meio de interpolação por krigagem ordinária utilizando-se o *software SGeMS*. Os parâmetros de entrada utilizados para aplicação da krigagem foram aqueles obtidos durante o estudo variográfico, respeitando assim os modelos de distribuição espacial de cada variável dentro do depósito.

As variáveis espessuras de argila, divididas em argilas do tipo 1 e do tipo 2, para os dois depósitos distintos foram tratadas separadamente de modo que não foi criado modelo espacial para argila total, ou seja, para somatória dos dois tipos de argila.

A decisão de estudar separadamente cada variável do depósito se deu pelo fato de se cumprir uma suposição importantíssima para utilização dos métodos de krigagem, a estacionariedade de segunda ordem. Na estacionariedade de segunda ordem assume-se que a média e o modelo de distribuição espacial da variância, ou o semivariograma de uma variável é a mesma para todo espaço amostral dessa mesma variável. Tal premissa não seria obedecida misturando-se espessuras de argila do tipo 1 com espessuras de argila do tipo 2.

Os resultados das interpolações para os dois depósitos estão apresentados nas Tabelas 1 e 2, a primeira contendo os valores de volume encontrados para o depósito de Campinal, e a segunda mostrando os valores obtidos para o depósito de Castilho.

Tabela 1 - Estimativas obtidas para o depósito de Campinal.

Material	Volume total em milhões de metros cúbicos ($m^3 \times 10^6$)	Volume total ($m^3 \times 10^6$) – Estimativas IPT (2008)	Espessura média (m)	Espessura média (m) IPT (2008)	Volume médio-média dos blocos da jazida ($m^3 \times 10^3$)
Argila do tipo 1 (minério)	8,00	7,42	0,95	0,8	9,56
Argila do tipo 2 (minério)	10,26	8,33	1,22	1,7	12,29
Minério total	18,26	15,75	--	0,8	--
Capeamento de areia (estéril)	16,86	--	2,01	1,6	40,33

Tabela 2 - Estimativas obtidas para o depósito de Castilho.

Material	Volume total em milhões de metros cúbicos ($m^3 \times 10^6$)	Volume total ($m^3 \times 10^6$) – Estimativas IPT (2008)	Espessura média (m)	Espessura média (m) IPT (2008)	Volume médio-média dos blocos da jazida ($m^3 \times 10^3$)
Argila do tipo 1 (minério)	14,95	13,71	0,78	0,7	8,26
Argila do tipo 2 (minério)	50,31	49,71	2,64	2,6	26,41
Minério total	65,26	63,42	3,42	3,2	--
Capeamento de areia (estéril)	15,04	--	--	1,0	--

Pode-se calcular o erro existente entre as duas estimativas de forma que:

$$E\% (\% \text{ erro}) = \frac{\text{Estimativas calculadas} - \text{Estimativas calculadas (IPT)}}{\text{Estimativas calculadas (IPT)}} \times 100$$

Tabela 3 - Cálculo da porcentagem do erro para as estimativas do Depósito de Castilho.

Depósito de Castilho			
Variável	Volume Estimado (m³x10⁶)	V. Estimado IPT (m³x10⁶)	(E) Erro %
Argila 1	14,95	13,71	9,04
Argila 2	50,31	49,71	1,20

Tabela 4 - Cálculo da porcentagem do erro para as estimativas do depósito de Campinal.

Depósito de Campinal			
Variável	Volume Estimado (m³x10⁶)	V. Estimado IPT (m³x10⁶)	(E) Erro %
Argila 1	8,0	7,42	7,82
Argila 2	10,26	8,33	23,17

Como pode-se observar nas Tabelas 3 e 4, a diferença entre as estimativas geradas aplicando-se geoestatística e aquelas obtidas para o relatório do IPT (2008), variam de aproximadamente 1% até 25%, o que em volume pode representar uma grande quantidade de material mas para efeitos de estimativa são valores aceitáveis.

As distribuições espaciais das estimativas de volume representadas em blocos para os depósitos de Campinal e de Castilho, para os dois diferentes tipos de minério, argila do tipo 1 e do tipo 2, constam nos Apêndices 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

As representações gráficas 3-D das estimativas de espessura estão representadas nas Figuras 26 à 29.

Outras relações obtidas ao analisarem-se as estimativas dos depósitos de Campinal e Castilho são as curvas de parametrização dessas jazidas. Essas curvas expressam as relações existentes entre um determinado teor de corte, no caso estudado uma espessura de corte, que

corresponde a um teor mínimo no qual o bem mineral sendo explorado é viável economicamente e que por fim separa o que é minério do que não é.

Tais parâmetros são utilizados para se planejar o tempo de vida da mina e seu retorno financeiro associado.

Para os depósitos aqui estudados as relações obtidas foram espessura de corte versus volume total do depósito, e espessura de corte versus volume médio dos blocos acima da espessura de corte.

Como fica evidente nos gráficos apresentados, o volume médio dos blocos acima da espessura de corte e o volume total do depósito são grandezas inversamente proporcionais, no que diz respeito as suas relações com uma determinada espessura de corte, sendo que o volume total do depósito decresce com o aumento do teor de corte enquanto que o teor médio aumenta, afinal de contas estaremos a selecionar blocos com teores maiores de minério, mas menores quantidades de blocos no total.

As relações de parametrização para os depósitos de Campinal e de Castilho podem ser encontradas nos Gráficos 1 ao 8, e nas Tabelas 5 à 8.

Tabela 5 - Resultados da construção da tabela de relação teor de corte versus volume total, e versus volume médio por bloco. Minério argila do tipo 1 para o depósito de Campinal.

Argila 1 - Campinal		
Espessura de Corte (m)	Volume (Milhões de m ³)	Volume médio (m ³ x10 ³)
0	7.95	9.56
0.5	7.24	12.84
1	5.42	17.11
1.5	3.55	21.39
2	2.03	25.71
2.5	0.86	33.34

Gráfico 1 – Relação espessura de corte versus volume total de minério disponível. Minério – argila do tipo 1, depósito de Campinal.

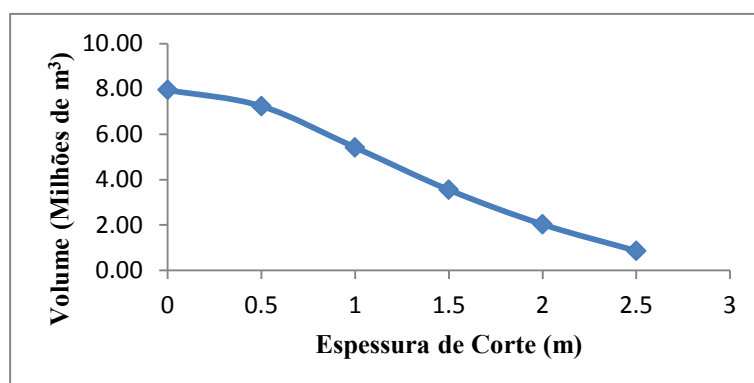


Gráfico 2 – Relação espessura de corte versus volume médio por bloco. Minério – argila do tipo 1, depósito de Campinal.

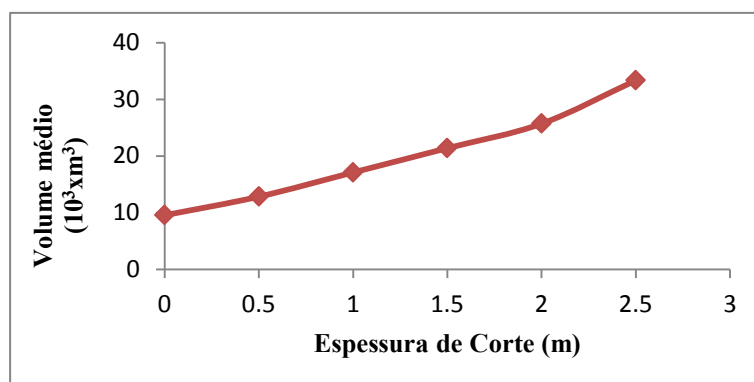


Tabela 6 - Resultados da construção da tabela de relação teor de corte versus volume total, e versus volume médio por bloco. Minério argila do tipo 2 para o depósito de Campinal.

Argila 2 - Campinal		
Espessura de Corte (m)	Volume (Milhões de m ³)	Volume médio (m ³ x10 ³)
0	10.22	12.3
0.5	9.96	13.28
1	8.40	15.41
1.5	4.46	19.55
2	1.90	24.04
2.5	0.67	28

Gráfico 3 - Relação espessura de corte versus volume total de minério disponível. Minério – argila do tipo 2, depósito de Campinal.

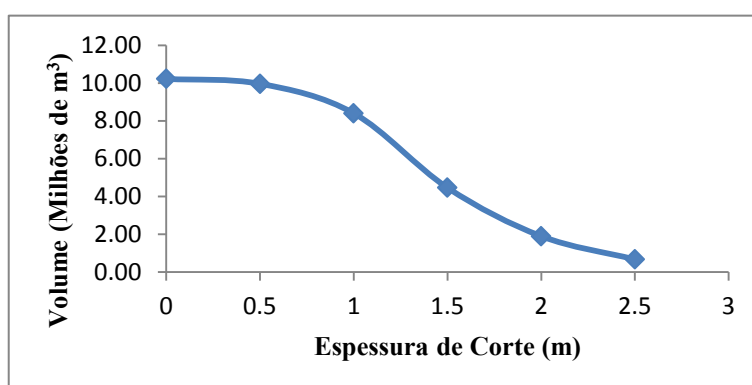


Gráfico 4 - Relação espessura de corte versus volume médio por bloco. Minério – argila do tipo 2, depósito de Campinal.

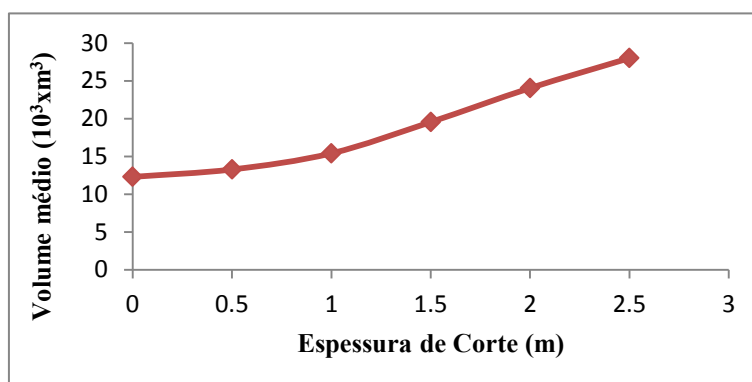


Tabela 7 - Resultados da construção da tabela de relação teor de corte versus volume total, e versus volume médio por bloco. Minério argila do tipo 1 para o depósito de Castilho.

Argila 1 - Castilho		
Espessura de Corte (m)	Volume (Milhões de m ³)	Volume médio (m ³ x10 ³)
0	17.95	8.25
0.5	15.51	11.68
1	10.30	16.8
1.5	6.58	21.4
2	3.88	26.05
2.5	2.33	29.24
3	0.87	32.38

Gráfico 5 - Relação espessura de corte versus volume total de minério disponível. Minério – argila do tipo 1, depósito de Castilho.

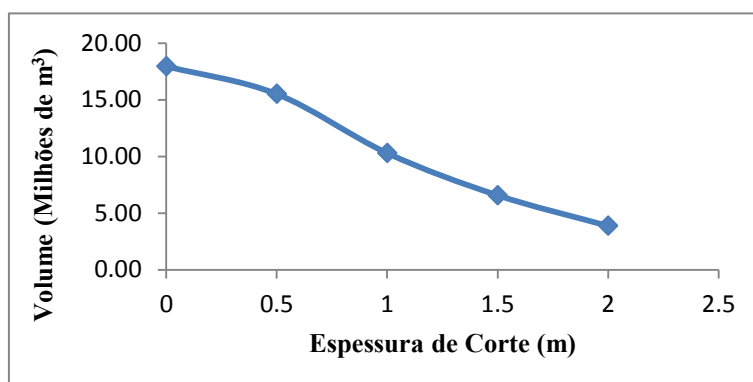


Gráfico 6 - Relação espessura de corte versus volume médio por bloco. Minério – argila do tipo 1, depósito de Castilho.

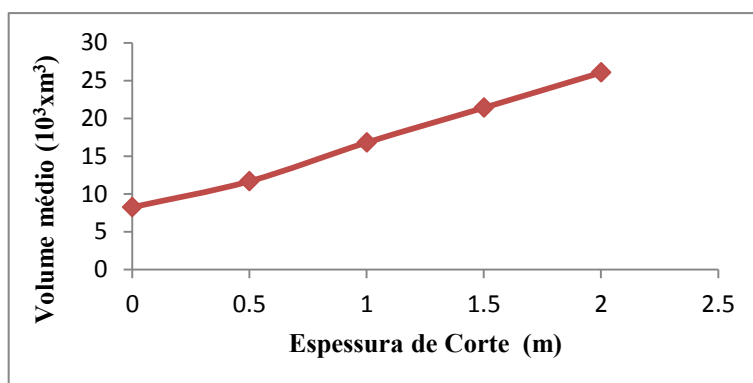


Tabela 8 - Resultados da construção da tabela de relação teor de corte versus volume total, e versus volume médio por bloco. Minério argila do tipo 2 para o depósito de Castilho.

Argila 2 - Castilho		
Espessura de Corte (m)	Volume (Milhões de m ³)	Volume médio (m ³)
0.466	51.460	26415
1.5	47.830	29203
2.5	34.910	35121
3.5	18.340	41793
4.5	5.135	50130

Gráfico 7 - Relação espessura de corte versus volume total de minério disponível. Minério – argila do tipo 2, depósito de Castilho.

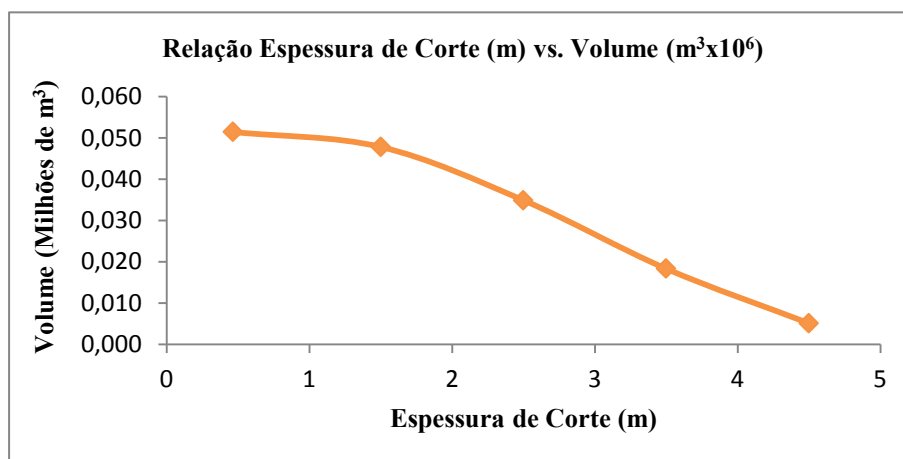


Gráfico 8 - Relação espessura de corte versus volume médio por bloco. Minério – argila do tipo 2, depósito de Castilho.

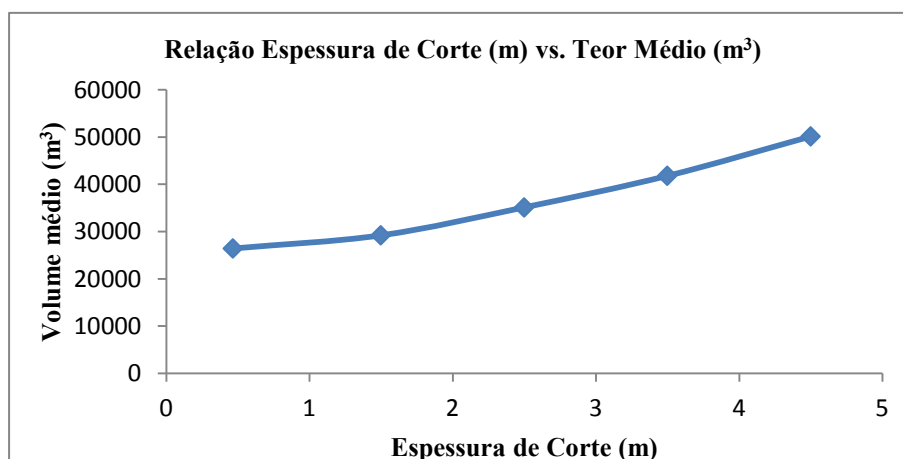


Figura 26 - Superfície 3-D representando a distribuição das espessuras de argila do tipo 1 para o depósito de Campinal, em mapa.

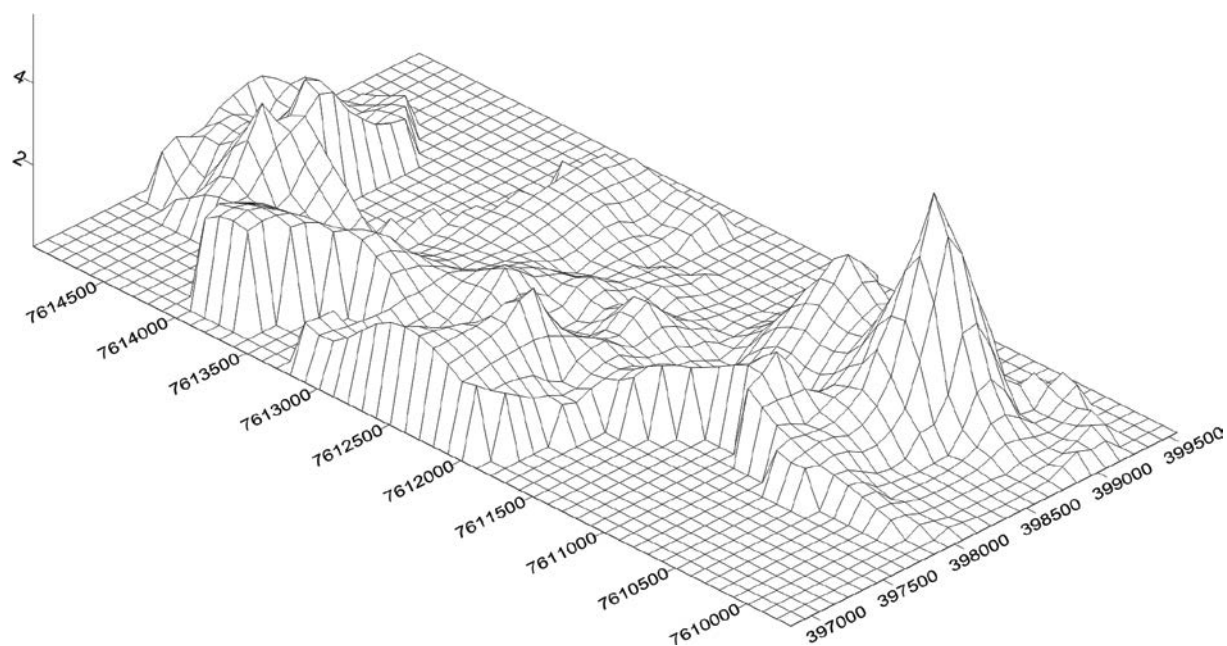


Figura 27 - Superfície 3-D representando a distribuição das espessuras de argila do tipo 2 para o depósito de Campinal.

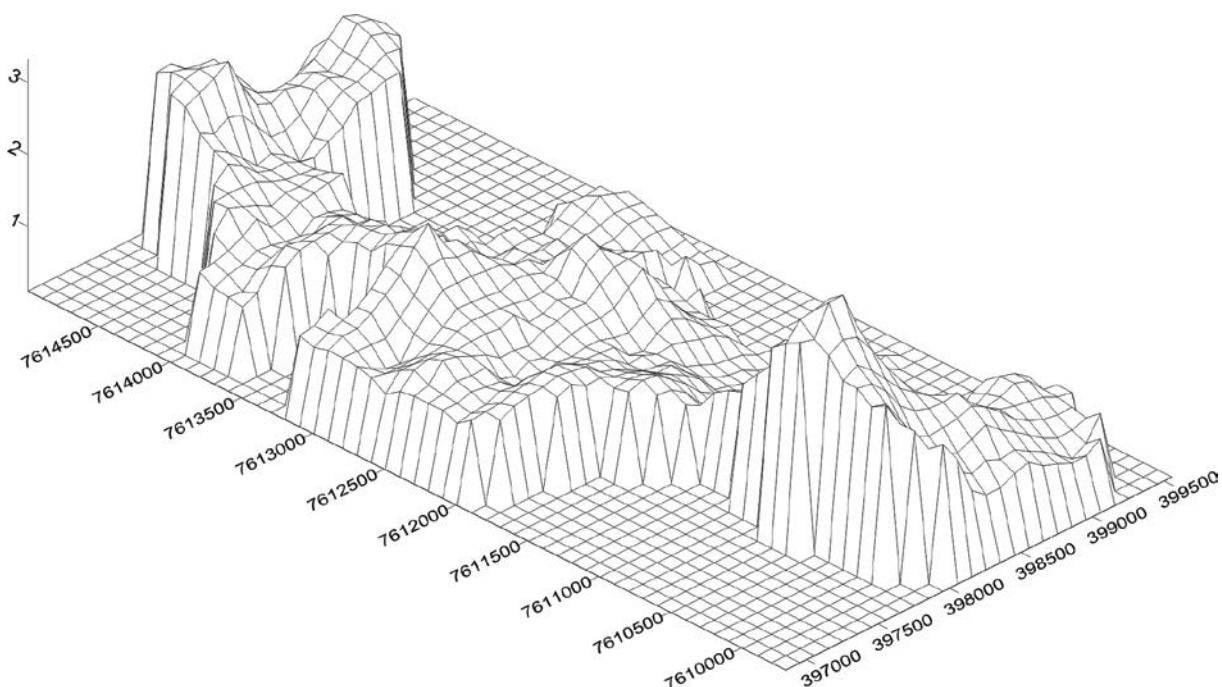


Figura 28 - Superfície 3-D representando a distribuição das espessuras de argila do tipo 1 para o depósito de Castilho.

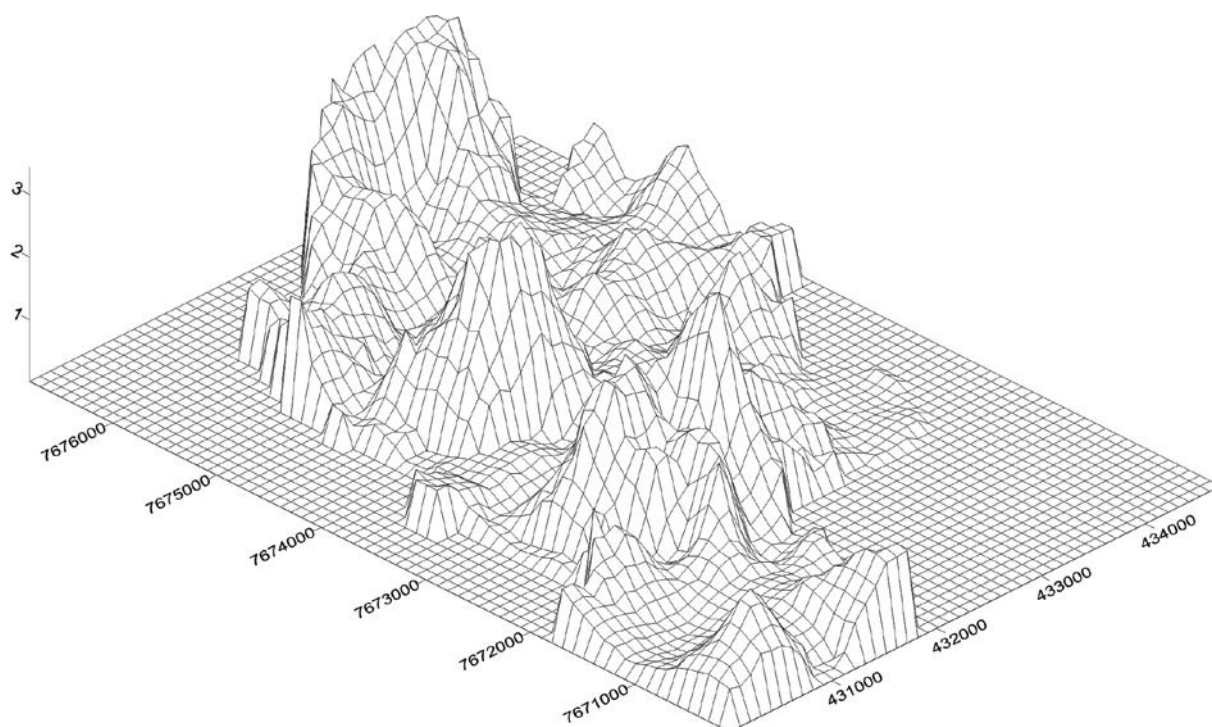
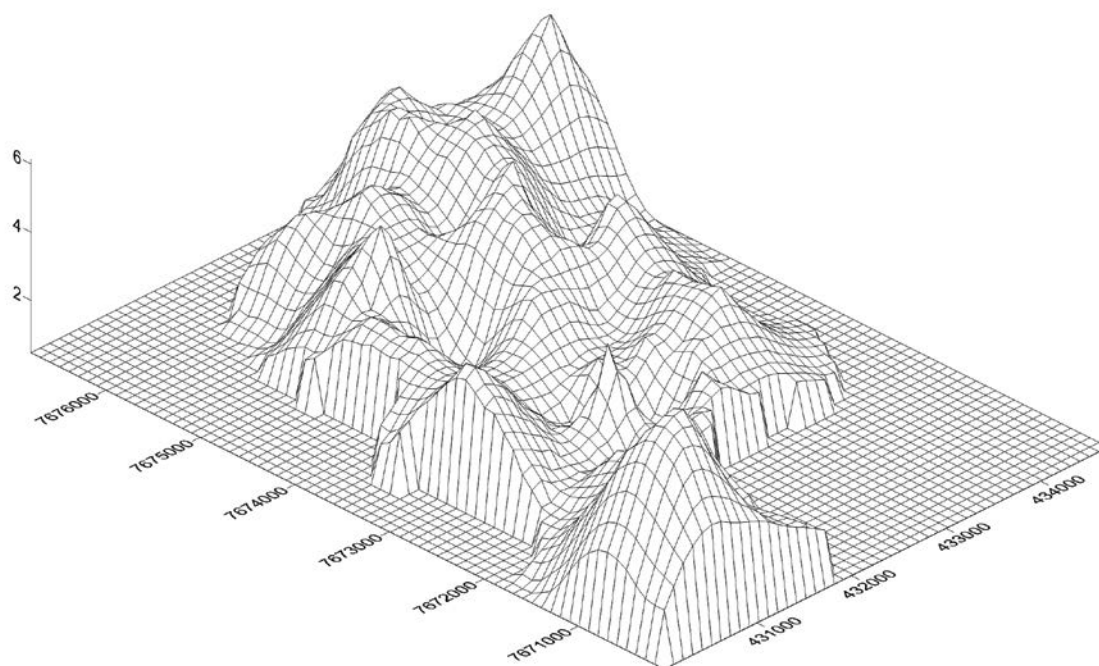


Figura 29 - Superfície 3-D representando a distribuição das espessuras de argila do tipo 2 para o depósito de Castilho.



7 CONCLUSÕES

No que concerne as estimativas de volume, os resultados encontrados utilizando-se das ferramentas geoestatísticas não apresentam grande diferença daqueles gerados utilizando algoritmos automáticos, tal como os quais utilizados para estimarem-se os volumes e correspondentes tonelagens para os depósitos de Castilho e Campinal presentes no parecer técnico gerado pelo IPT em 2008.

A diferença existente entre os métodos portanto reside nos resultados gerados durante o desenvolvimento do trabalho, tais como o estudo de correlação, continuidade e anisotropia espacial oferecidos pela confecção dos variogramas.

Apesar de estarem próximos, os valores obtidos por meio da krigagem ainda são maiores do que aqueles obtidos utilizando-se o método *Topo to Raster* do ArcGis. Levando-se em consideração que as interpolações geradas por meio da krigagem ordinária tem a tendência de suavizar as estimativas, ou seja, subestimar os valores que serão estimados, pode-se concluir que essa suavização é ainda maior quando utilizado o método que foi aplicado para o cálculo das reservas apresentadas no relatório do IPT.

Esse é um fator importante na escolha da krigagem ordinária e do modelamento espacial realizado utilizando-se de estudo variográfico em relação aos modelos implícitos. Essa afirmação pode ser justificada pelo fato de ter-se em mãos um modelo que descreva antes de qualquer estimativa a distribuição espacial das variáveis, ou seja, os variogramas que precedem as equações de krigagem e a estimativas geradas, e por fim estimativas com menor erro possível associado.

Tem-se portanto mais argumentos que favorecem a utilização de modelos confeccionados por estudo de continuidade espacial em relação aos que não oferecem.

Quanto aos mapas gerados pelas interpolações provenientes da krigagem, pode-se dizer que os mesmos auxiliam em muito não só uma exploração melhor planejada dos recursos minerais existentes mas também oferecem uma ferramenta para se entender a geometria e distribuição dos corpos de argila, dando pistas sobre os possíveis processos deposicionais responsáveis pela gênese desses materiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENTLEY, L. R. *Geostatistics*. Universidade de Calgary. Calgary, Canadá. Novembro, 2014. Notas de aula.

CLARK, I.; HARPER, W. V. *Practical geostatistics 2000*. Geostokos (Ecosse) Limited, 2000.

IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. *Parecer técnico N ° 16 413-301*: avaliação de reservas de argila para o suprimento sustentável do APL de cerâmica vermelha do oeste paulista. São Paulo: IPT, 2008.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. *An introduction to applied geostatistics*. Nova Iorque: Oxford University Press, 1989.

JOINT ORE RESERVES COMMITTEE (JORC). *Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves (The JORC Code)*. 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1179/aes.2001.110.3.121>>. Acesso em: 05 nov 2015.

NAKASU, L. *Recursos minerais do Rio Paraná a montante de Guaíra*. 1998. 198 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro – SP. 1998.

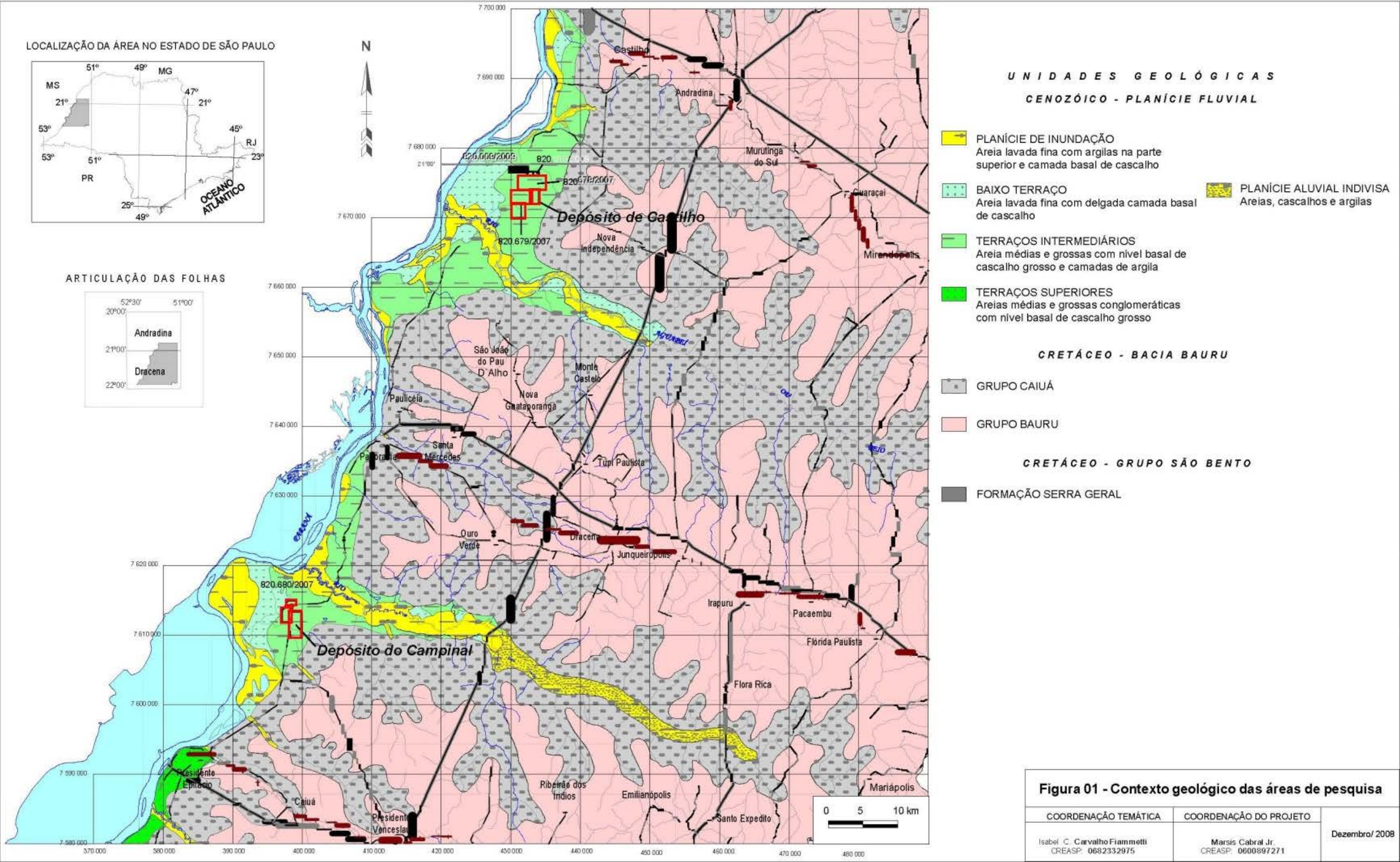
ORFEO, O.; STEVAUX, J. C. Hydraulic and morphological characteristics of middle and upper reaches of the Paraná River (Argentina and Brazil). *Geomorphology*, v. 44, n. 3-4, p. 309-322. 2002. 44, 309–322. Disponível em: <[http://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00180-5](http://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00180-5)>. Acesso em: 02 dez 2015.

STEVAUX, J. C. The upper Paraná river (Brazil): geomorphology, sedimentology and paleoclimatology. *Quaternary International*, v. 21, p. 143-161. 1994. Disponível em: <[http://doi.org/10.1016/1040-6182\(94\)90028-0](http://doi.org/10.1016/1040-6182(94)90028-0)>. Acesso em: 02 dez 2015.

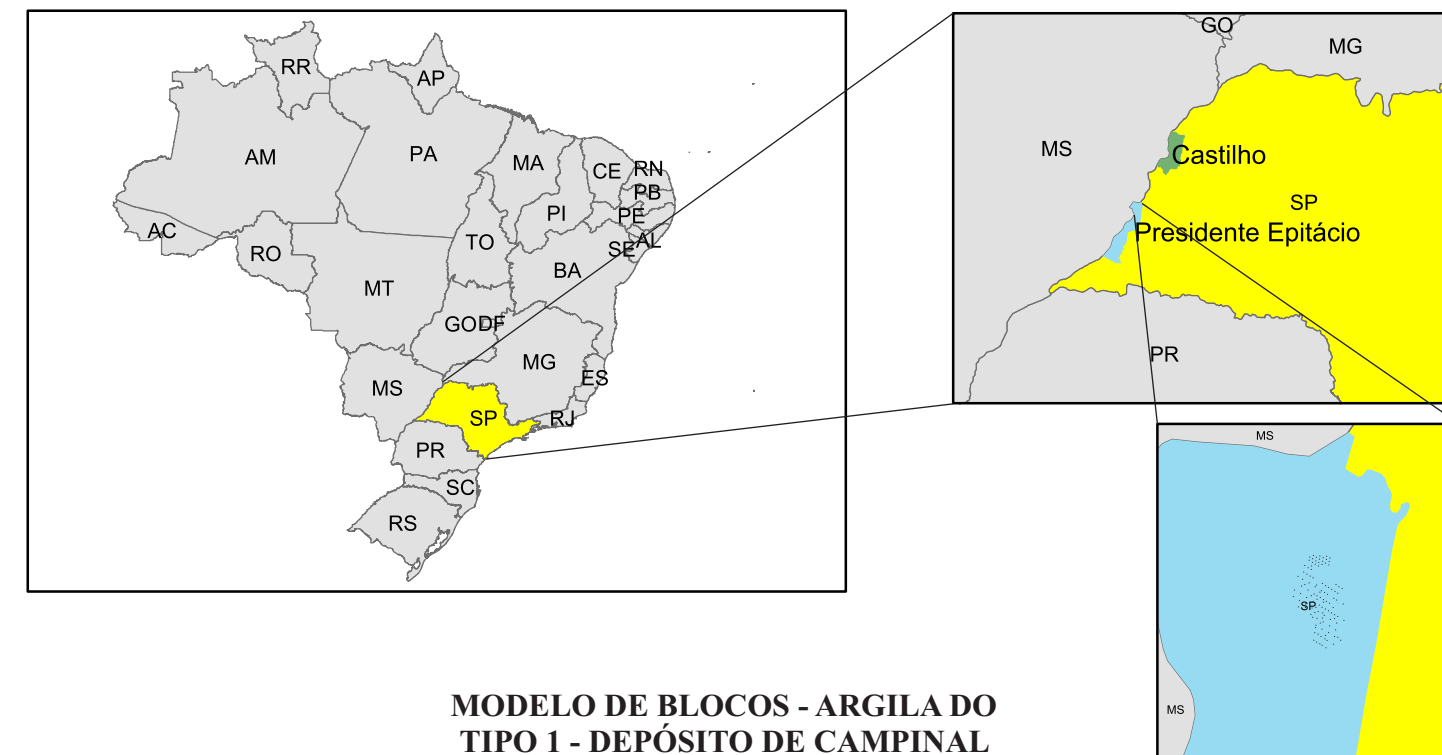
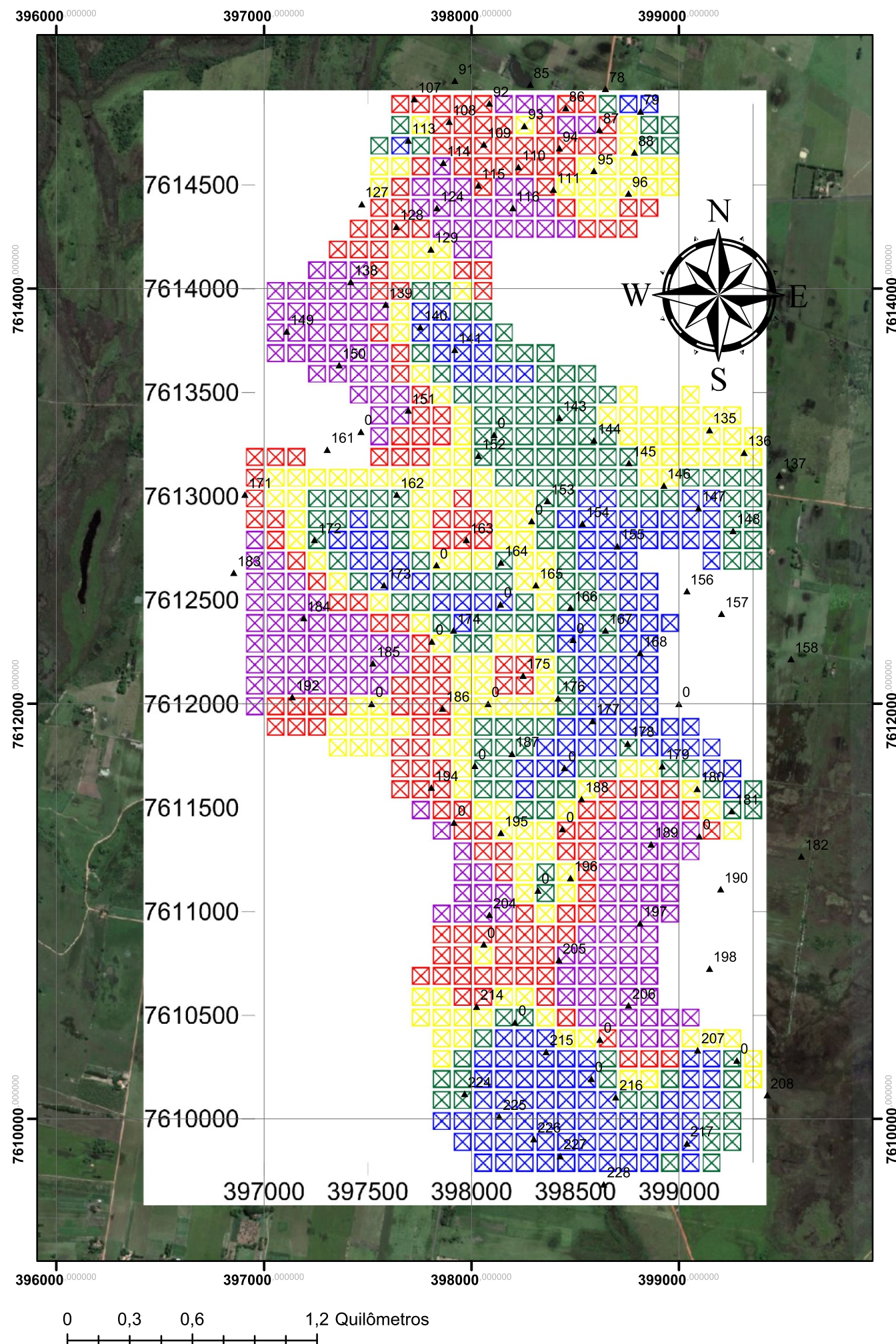
STEVAUX, J. C. *O Rio Paraná: geomorfogênese, sedimentação e evolução quaternária do seu curso superior (região de Porto Rico, PR)*. 1994. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44136/tde-30062015-145032/>>. Acesso em: 05 nov 2015.

STEVAUX, J. C.; MARTINS, D. P.; MEURER, M. Changes in a large regulated tropical river: the Paraná River downstream from the Porto Primavera dam, Brazil. *Geomorphology*, v. 113, n. 3-4, p. 230–238. 2009. Disponível em: <<http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.03.015>>. Acesso em: 02 dez 2015.

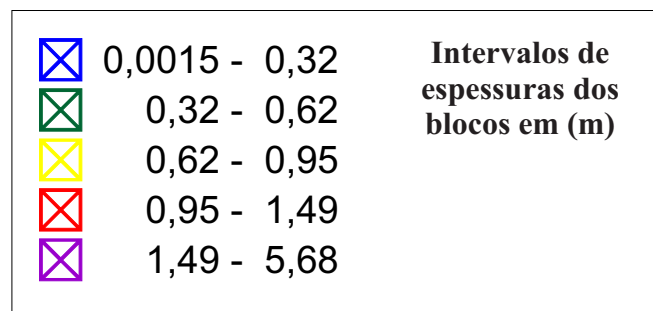
ANEXO A - Mapa geológico das áreas de estudo e de suas adjacências.



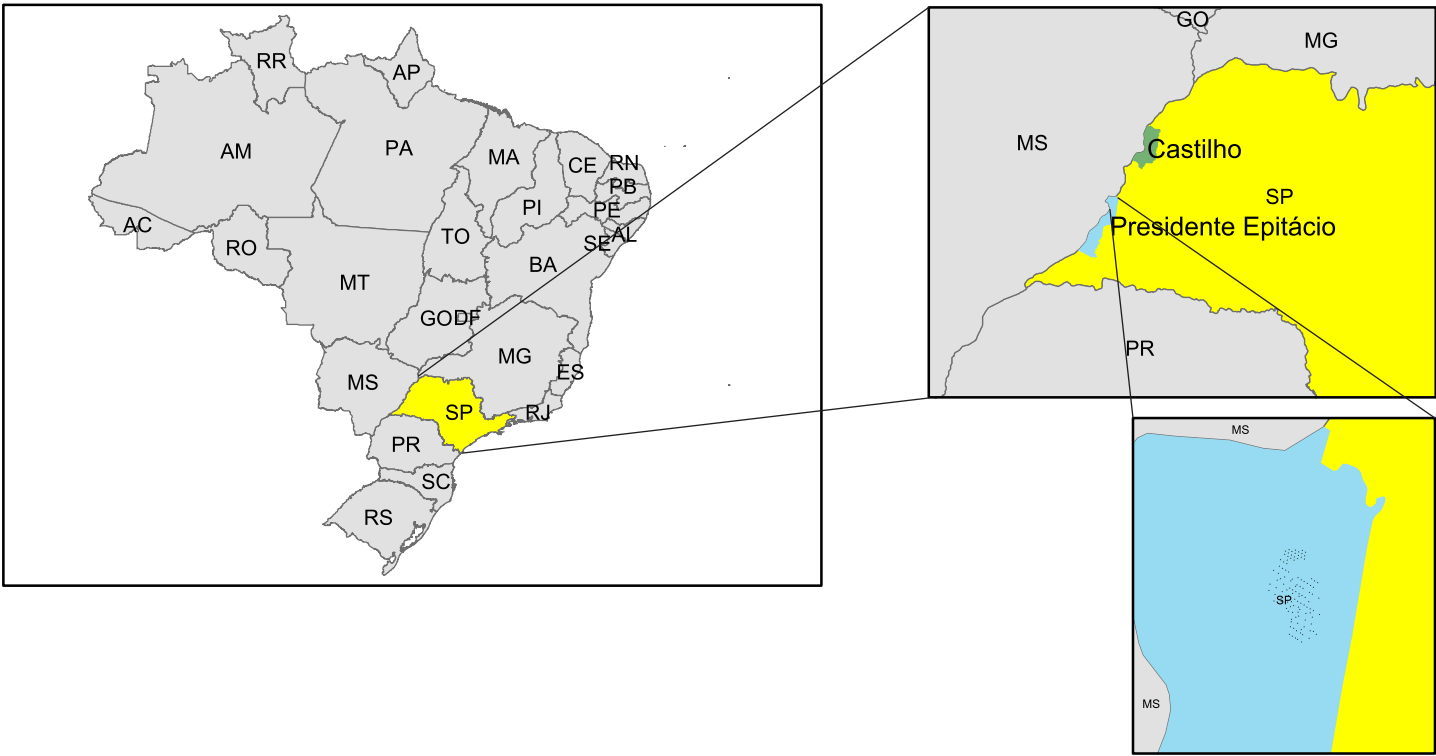
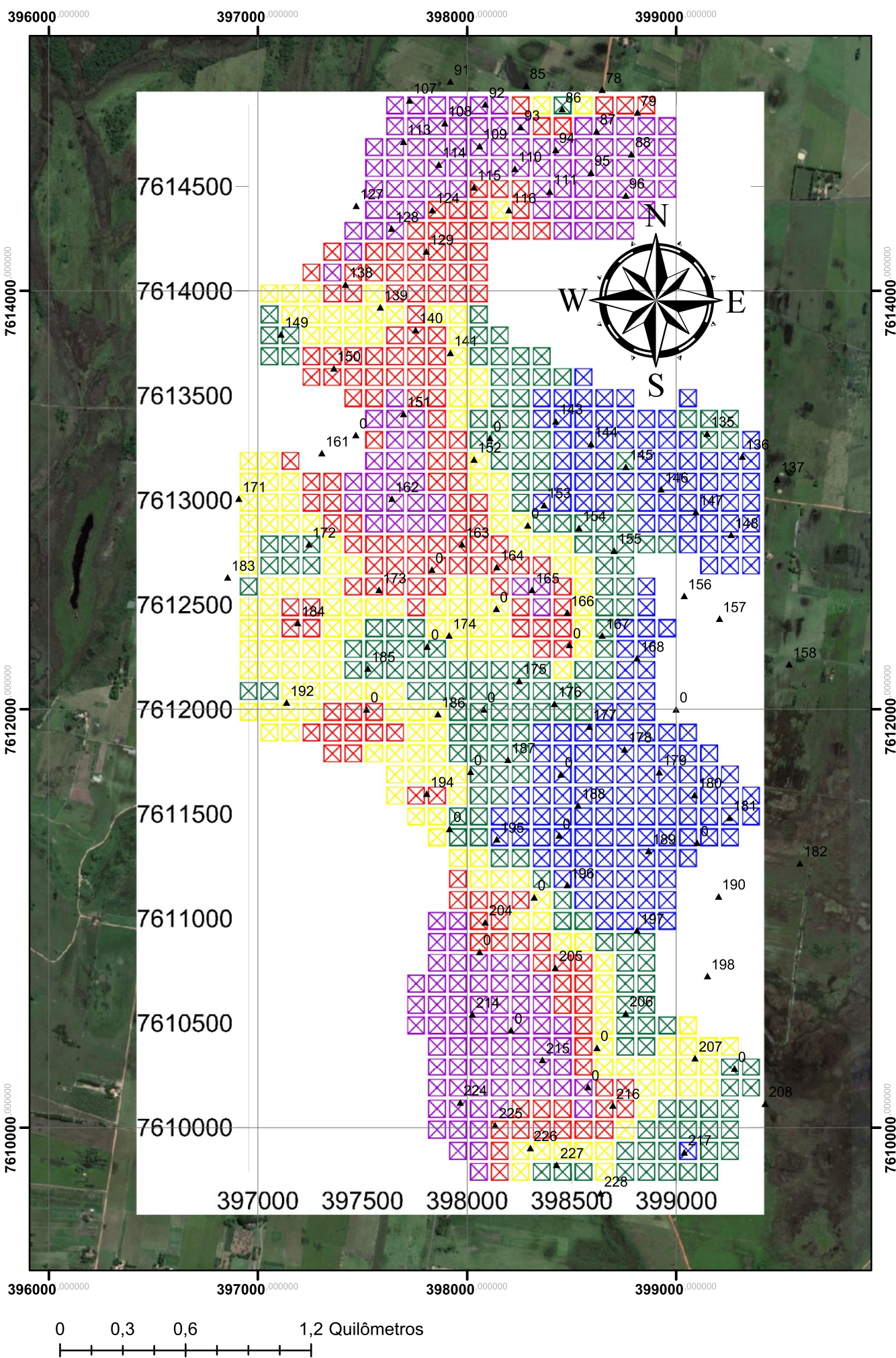
Fonte: IPT (2008).



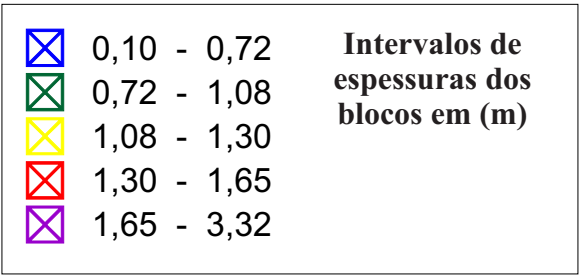
MODELO DE BLOCOS - ARGILA DO TIPO 1 - DEPÓSITO DE CAMPINAL



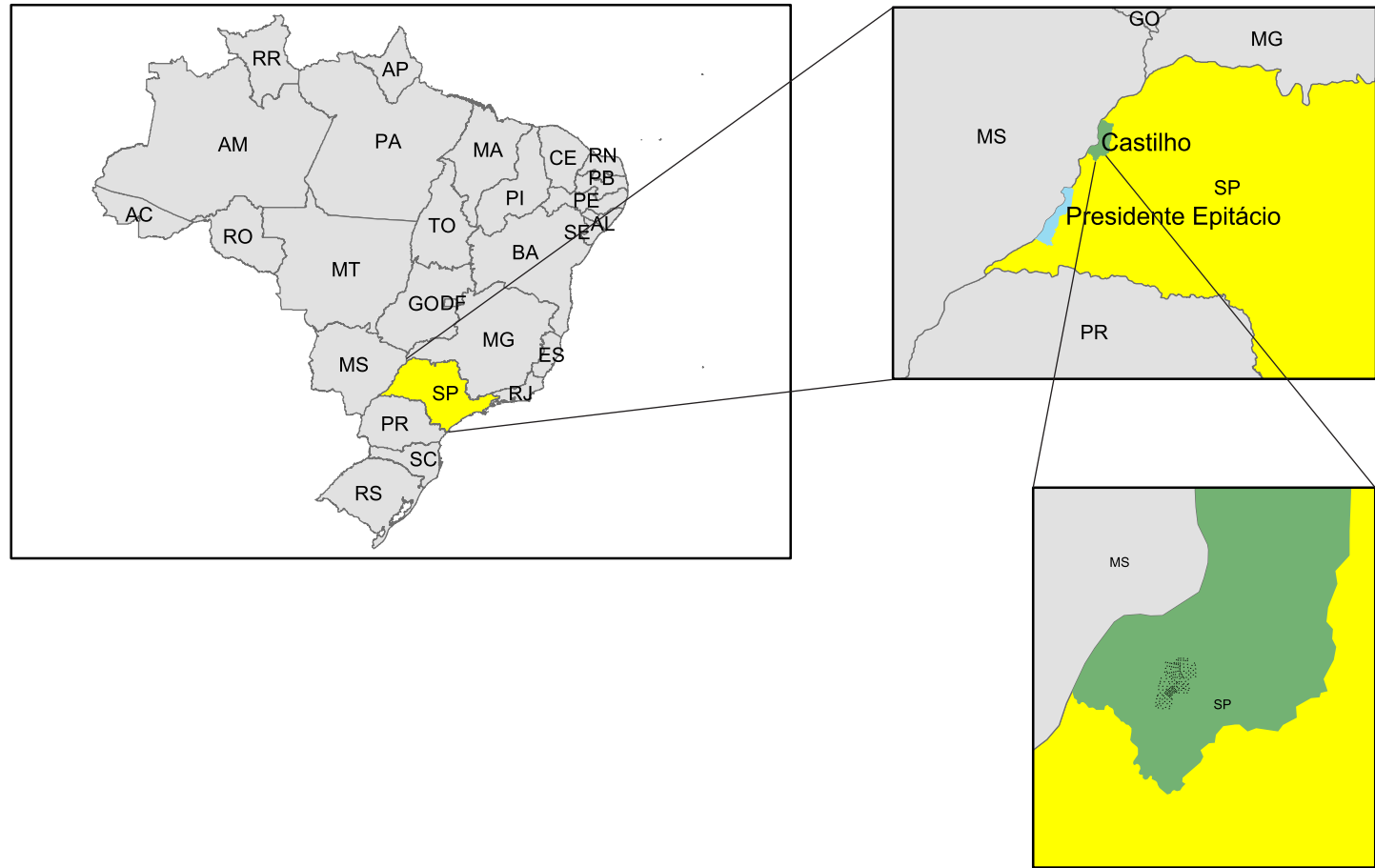
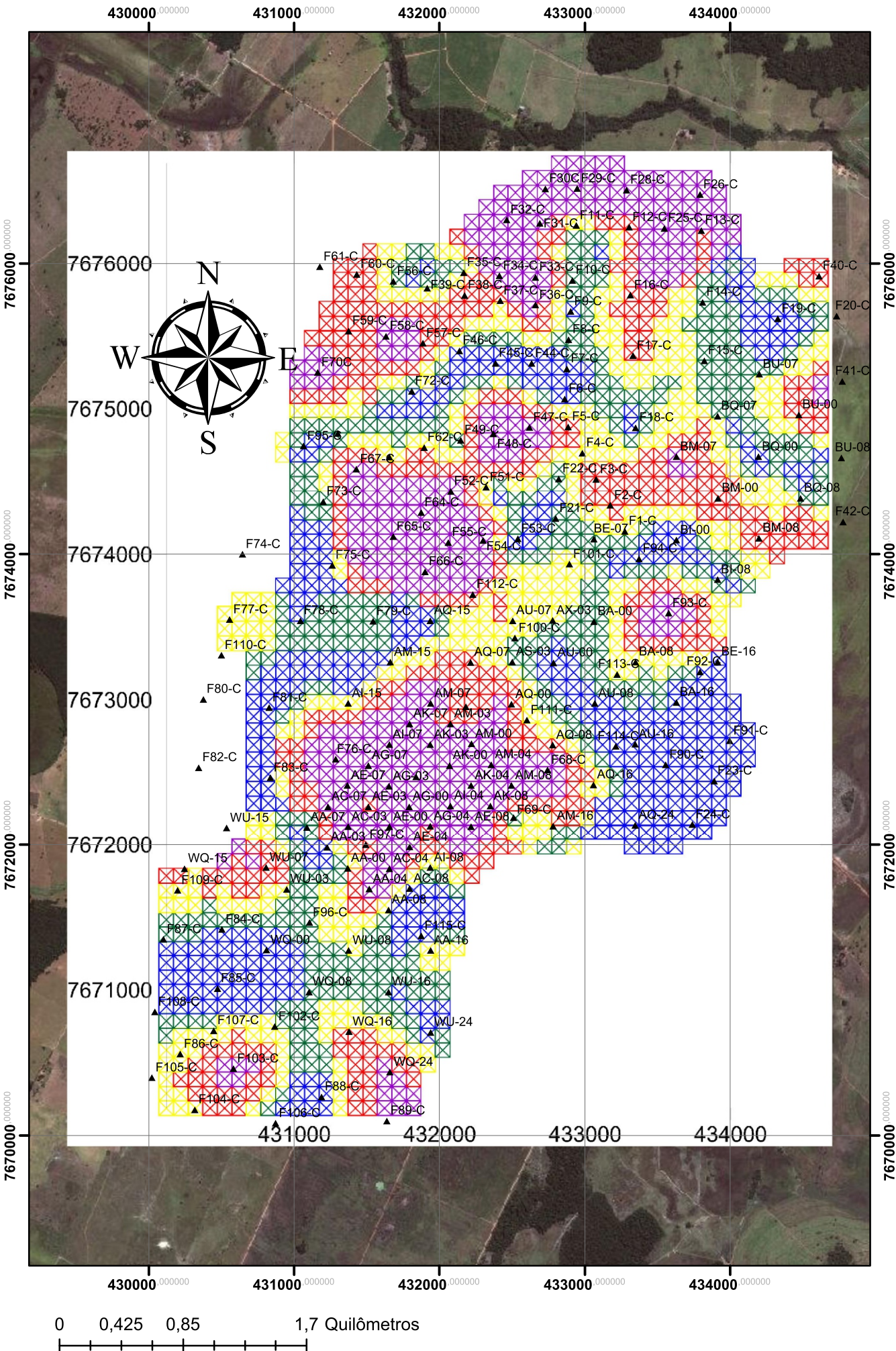
unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" Câmpus de Rio Claro		
AVALIAÇÃO GEOESTATÍSTICA DE DEPÓSITOS DE ARGILA PARA A INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA. ESTUDO DE CASO EM CASTILHO E PRESIDENTE EPITÁCIO, OESTE PAULISTA		APÊNDICE 1 - Modelo de Blocos Argila do tipo 1 – Depósito de Campinal.
Autor: Eric Scarpellini Camargo	Orientador: Prof. Dr. José Ricardo Sturaro	Ano: 2015 Projeção: UTM fuso 22 Datum: SAD 69



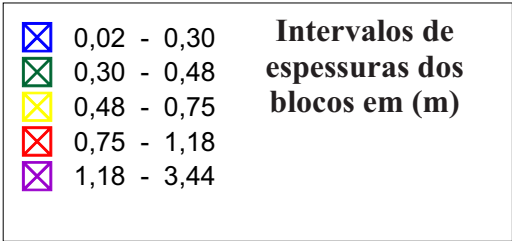
MODELO DE BLOCOS - ARGILA DO TIPO 2 - DEPÓSITO DE CAMPINAL



unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" Câmpus de Rio Claro		
AVALIAÇÃO GEOESTATÍSTICA DE DEPÓSITOS DE ARGILA PARA A INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA. ESTUDO DE CASO EM CASTILHO E PRESIDENTE EPITÁCIO, OESTE PAULISTA		APÊNDICE 2 - Modelo de Blocos Argila do tipo 2 – Depósito de Campinal.
Autor: Eric Scarpellini Camargo	Orientador: Prof. Dr. José Ricardo Sturaro	Ano: 2015 Projeção: UTM fuso 22 Datum: SAD 69



MODELO DE BLOCOS - ARGILA DO TIPO 1 - DEPÓSITO DE CASTILHO



unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" Câmpus de Rio Claro		
AVALIAÇÃO GEOESTATÍSTICA DE DEPÓSITOS DE ARGILA PARA A INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA. ESTUDO DE CASO EM CASTILHO E PRESIDENTE EPITÁCIO, OESTE PAULISTA		APÊNDICE 3 - Modelo de Blocos Argila do tipo 1 – Depósito de Castilho.
Autor: Eric Scarpellini Camargo	Orientador: Prof. Dr. José Ricardo Sturaro	Ano: 2015 Projeção: UTM fuso 22 Datum: SAD 69

