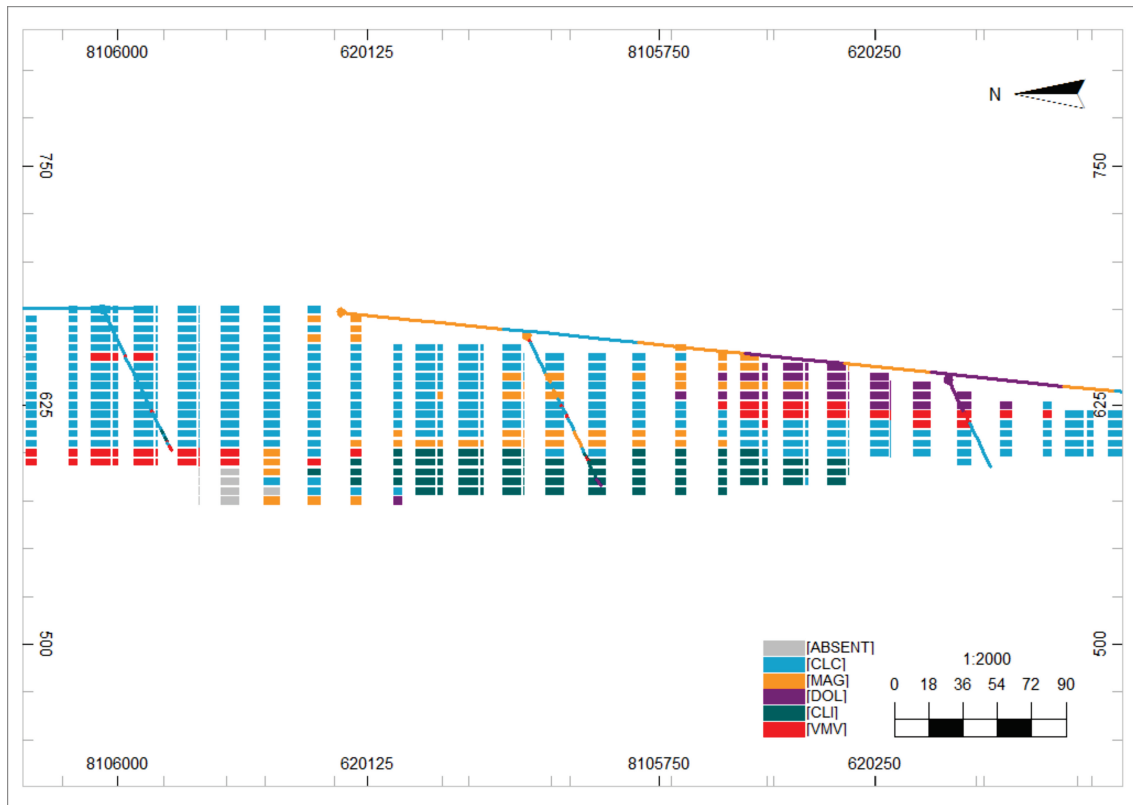


Figura 5.10 – Seção vertical “E” do modelo geológico mostrando os domínios geológicos e estimados e amostrais em cores correspondentes.



Fonte: O autor (2017)

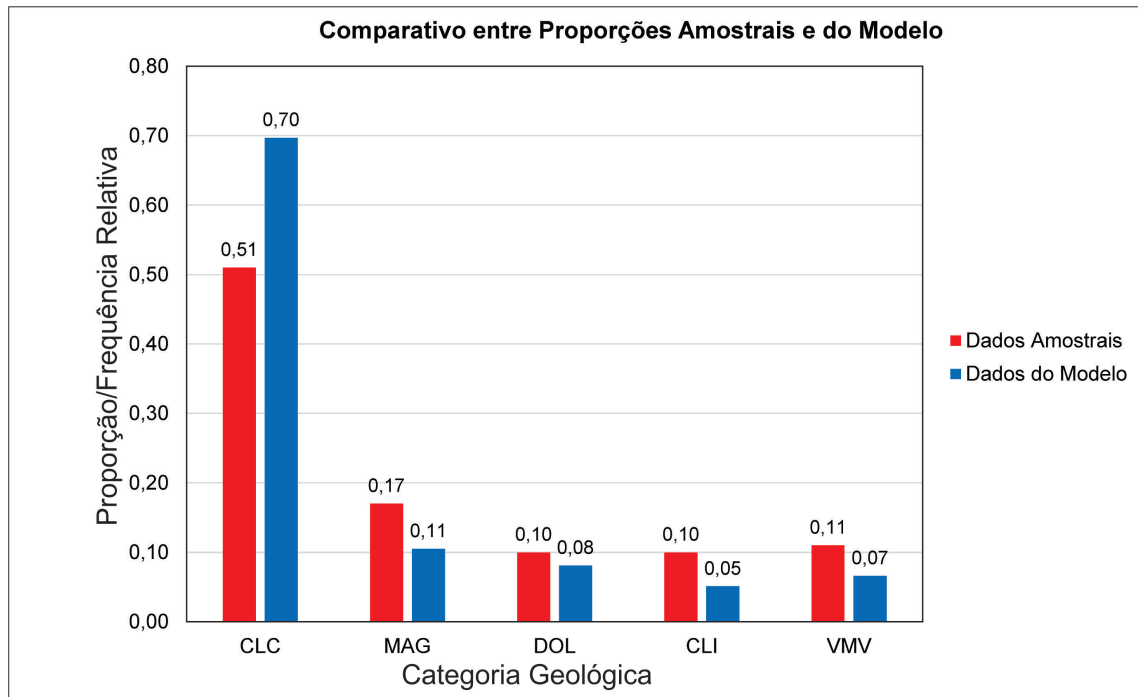
As diferenças entre as proporções amostrais e do modelo, (Figura 5.11 e Tabela 5.6), são maiores nas categorias/idades geológicas com pequenas frequências relativas (MAG, DOL, CLI e VMV). Dessas, a maior diferença está atribuída à unidade CLI, cuja frequência relativa do modelo foi 49% menor que a frequência relativa amostral. Ao contrário, a unidade DOL apresentou o menor desvio, de -19%, em relação aos dados amostrais. Observa-se ainda que, em média, houve um desvio negativo de 21,9%, ou seja, em média, houve uma diminuição de 21,9% nas proporções do modelo em relação às proporções amostrais.

Tabela 5.6 – Comparativo entre proporções/frequências relativas dos dados amostrais e do modelo estimado com os respectivos desvios.

Domínio	Proporções		Diferença (%)
	Amostras	Modelo Final	
CLC	0,51	0,70	+36,67
MAG	0,17	0,11	-38,2
DOL	0,10	0,08	-19,0
CLI	0,10	0,05	-49,0
VMV	0,11	0,07	-40,0

Fonte: O autor (2017)

Figura 5.11 – Comparação entre frequências relativas dos domínios nos dados amostrais e no modelo estimado por krigagem indicadora.



Fonte: O autor (2017)

As diferenças entre o modelo probabilístico e a realidade observada (amostras) podem ser consequências de três fatores, cada um com uma contribuição: (i) espaçamento amostral da malha de perfuração; (ii) diferenças de tamanho - suporte - das amostras, e; (iii) ocorrência de calcário calcítico nas bordas do modelo geológico, cujos blocos foram estimados basicamente como tal em virtude de ausência de maior quantidade de informações sobre as demais categorias.

Os resultados da variografia dos dados indicadores mostraram que determinados variogramas, particularmente na direção leste, não demonstraram um crescimento na origem bem definido, sobretudo devido ao espaçamento amostral, tornando o ajuste variográfico um procedimento sujeito a inferências. Portanto, a inclusão de novas informações geológicas pode eventualmente atuar no sentido de melhorar a compatibilidade entre modelo geológico e realidade (amostras).

O suporte amostral é um fator importante no processo de estimativa de variáveis geológicas, particularmente de teores. Observando-se os valores dos suportes amostrais por unidade litológica, e comparando-se tais valores com o valor mais recorrente (moda) do banco de dados (cinco metros), nota-se (Tabela 5.7) que a unidade CLC apresenta, em relação à quantidade total de amostras, 21% com comprimento maior que cinco metros, seguida, em ordem, pelas unidades MAG, DOL, CLI e VMV. Sabendo-se que essa unidade detém a maior parcela de amostras (51% do total), uma diminuição do tamanho amostral

visando a uma maior regularização dos suportes amostrais aumentaria, eventualmente, o número de amostras da mesma, e conseqüentemente a sua frequência relativa amostral, aproximando-se então da proporção obtida com o modelo geológico (0,70). Assim, a regularização do tamanho das amostras teria um efeito positivo, não somente na unidade CLC, mas em todas as unidades geológicas.

Tabela 5.7 – Domínios litológicos e os respectivos valores médios, máximos e frequências acima de cinco metros dos comprimentos amostrais.

Domínio	Média (m)	Máximo (m)	Frequência
CLC	9,58	67,48	0,21
MAG	16,46	83,00	0,10
DOL	12,75	70,25	0,06
CLI	13,59	94,54	0,04
VMV	5,52	51,72	0,03

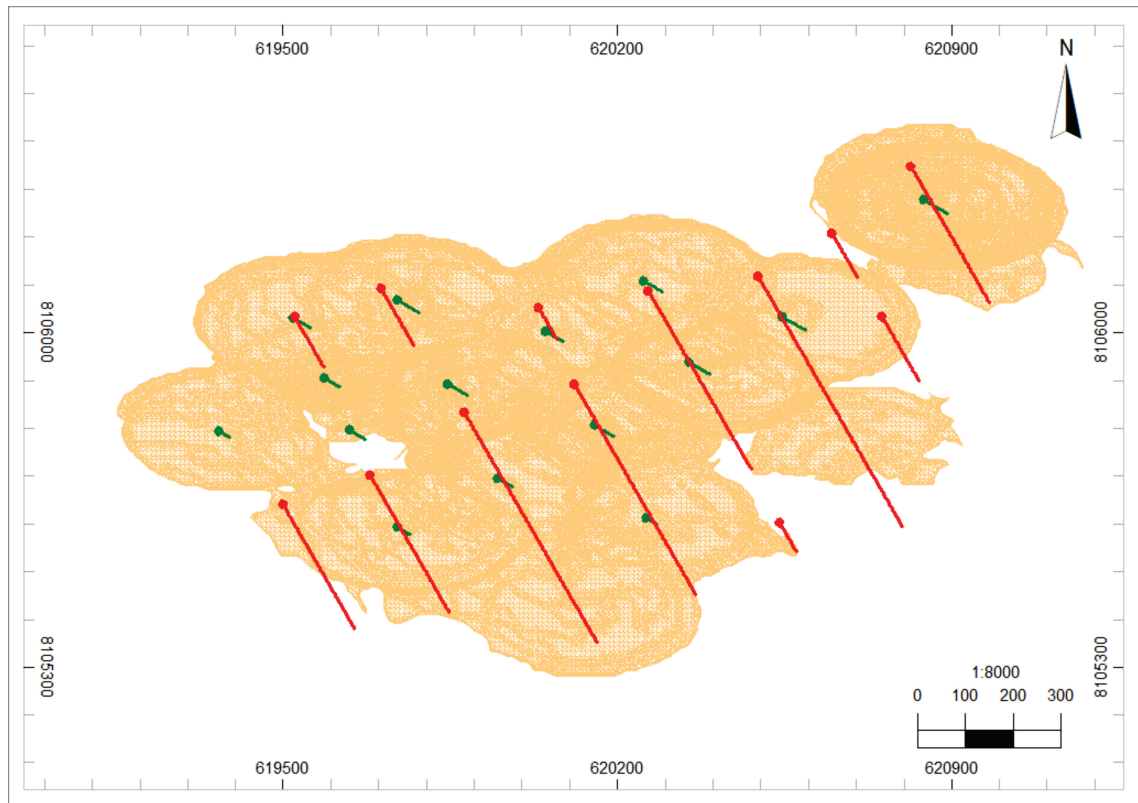
Fonte: O autor (2017)

Outra causa importante, embora com uma menor contribuição em relação à demais, é a presença notável da categoria “calcário calcítico” nos limites/borda do modelo geológico (Figura 5.12). Blocos nesses locais eventualmente podem ter sido estimados como sendo pertencentes a esta categoria em virtude de falta informações adicionais das demais categorias, o que aumenta também a proporção de calcário calcítico no modelo geológico resultante. Portanto, a adição de furos de mais informações nas bordas do modelo poderia: (i) tornar mais evidente a presença dessa unidade (CLC) nesses locais, e/ou; (ii) indicar a presença de outros domínios litológicos nos mesmos. Assim, poder-se-ia obter uma diminuição da proporção de calcário calcítico e conseqüente aumento das demais proporções no modelo geológico, tornando-o mais compatível com os dados amostrais.

A incerteza (1 – maior probabilidade) na delimitação dos contatos geológicos também foi avaliada, e o mapeamento da mesma indicou a presença de incertezas da ordem de até 79%, embora 14% das incertezas estejam menores que 1%, particularmente na unidade CLC, onde os valores abaixo de 1% representam 18,8% do total. Na Tabela 5.8 estão expostos os principais parâmetros estatísticos da distribuição da incerteza em cada domínio litológico e no modelo global.

Observa-se, pela Tabela 5.8, a ocorrência de valores mais elevados de incerteza nas unidades com pequena quantidade de amostras (MAG, DOL, CLI e VMV). Já na unidade CLC, o fato desta possuir o menor valor médio entre as cinco categorias indica a presença de valores mais baixos de incerteza em relação às demais. Isto porque tal domínio litológico representa, somente este, 51% do total de amostras, resultando, portanto, em estimativas com menor nível de incerteza.

Figura 5.12 – Mapa em planta com a delimitação da ocorrência da categoria CLC no modelo geológico. Linhas em verde indicam furos de sondagem e linhas em vermelho, amostras de canaletas.



Fonte: O autor (2017)

Tabela 5.8 – Principais parâmetros estatísticos da incerteza por domínio litológico.

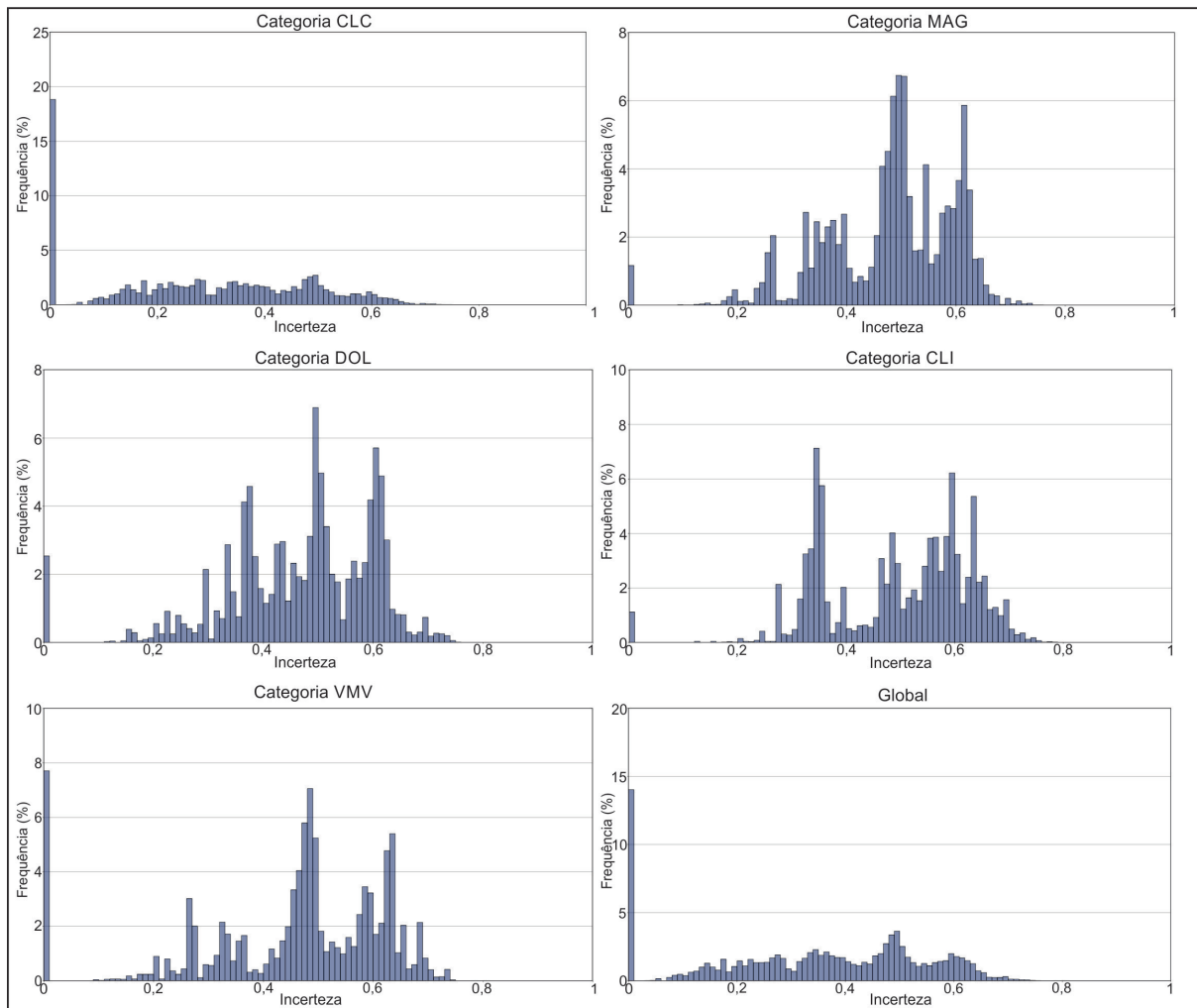
Domínio Litológico	Mínimo	Média	Máximo	Variância	Desvio Padrão
CLC	0,000	0,291	0,760	0,038	0,195
MAG	0,000	0,482	0,760	0,015	0,121
DOL	0,000	0,472	0,760	0,019	0,139
CLI	0,000	0,499	0,790	0,018	0,134
VMV	0,000	0,458	0,750	0,033	0,181
Total	0,000	0,347	0,790	0,040	0,200

Fonte: O autor (2017)

A unidade geológica que apresentou os maiores valores globais de incerteza, de acordo com a Tabela 5.8, foi a CLI, referente ao “calcário impuro”. Nesta, a incerteza atingiu o valor máximo de 79%, com valor médio de 49,9%. As categorias MAG, DOL e VMV apresentam valores relativamente menores de incerteza em relação a esta unidade, embora, em termos gerais, elevados, o que pode ser consequência da pequena quantidade de amostras existentes dessas unidades em relação ao total amostrado.

A análise gráfica da incerteza por meio dos histogramas, em cada domínio litológico (Figura 5.13), mostra evidentemente a ocorrência de valores mais elevados de incerteza nas categorias MAG, DOL, CLI e VMV, enquanto o domínio litológico CLC apresentou uma grande quantidade de valores próximos de zero, e demais valores, maiores que este, com baixa participação no total estimado nesta categoria.

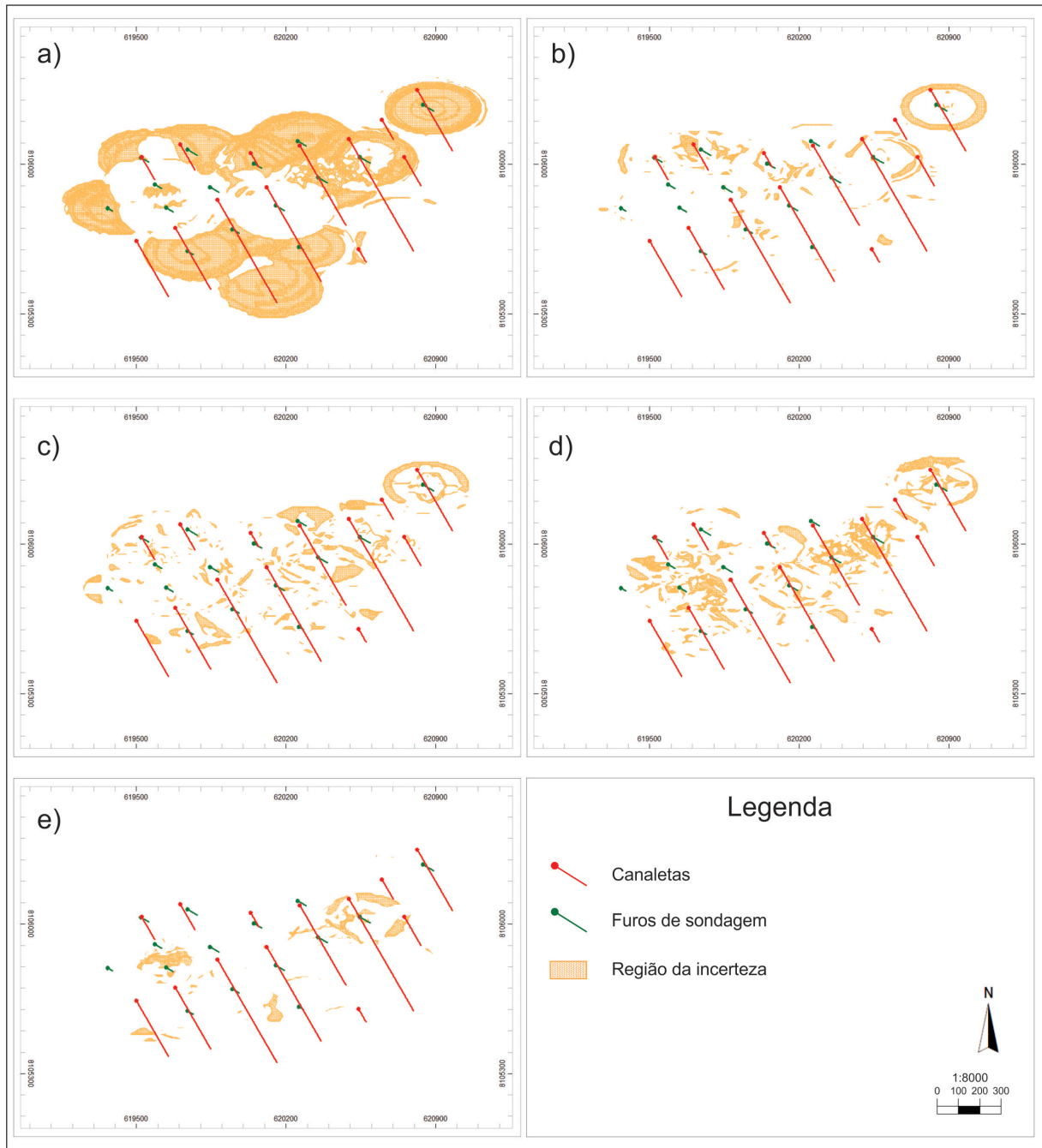
Figura 5.13 – Histogramas das incertezas nos domínios litológicos e no modelo global.



Fonte: O autor (2017)

A análise da distribuição espacial das incertezas (Figura 5.14) mostra uma ocorrência notável de valores muito próximos a zero nos limites do modelo geológico, coincidindo geralmente com as ocorrências do domínio CLC (Figura 5.12). Tal comportamento pode eventualmente ser consequência da falta de informações adicionais das demais categorias nesses locais para se ter uma participação maior das mesmas na estimativa das probabilidades de ocorrência, o que poderia resultar em valores maiores de incerteza, já que, em tese, haveria um aumento da variedade de domínios geológicos possíveis nesses locais.

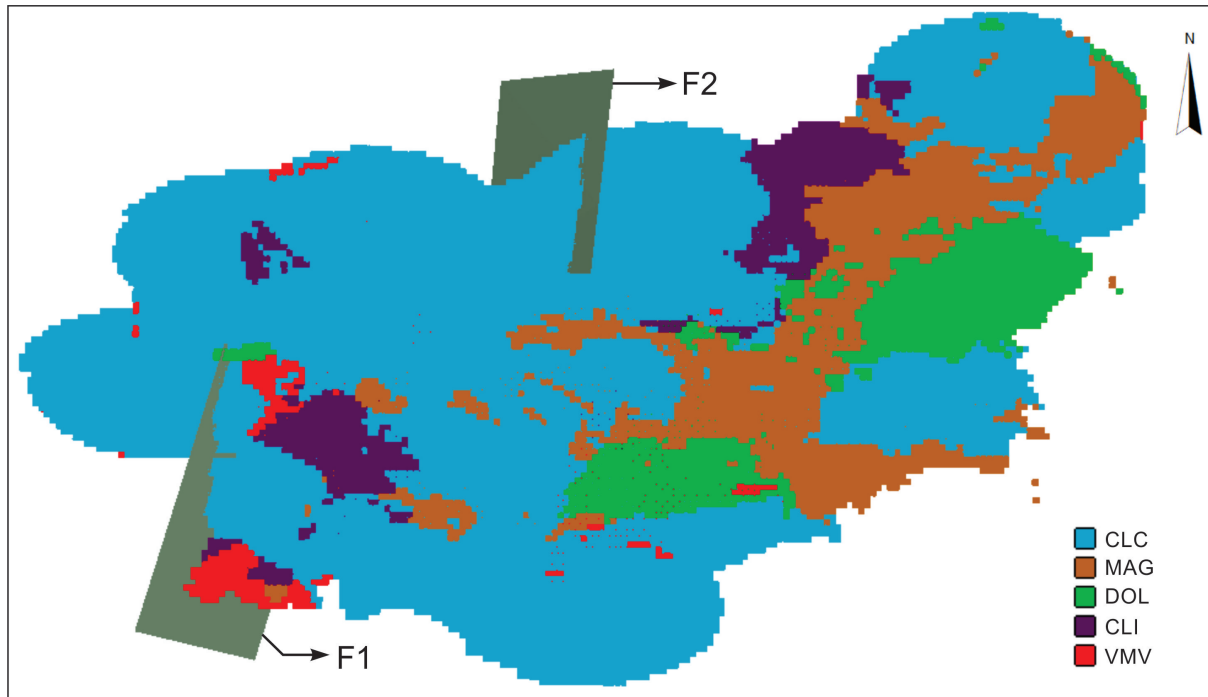
Figura 5.14 – Mapas de ocorrência de níveis de incerteza. a) 0%; b) 20%; c) 40%; d) 60%; e) 70%.



Fonte: O autor (2017)

Além dos resultados pertinentes ao modelo geológico obtido por krigagem indicadora, seções transversais no modelo evidenciaram a provável presença de duas falhas geológicas (Figura 5.15), uma do tipo inversa (F1), com direção do plano de falha de aproximadamente $16,7^\circ$ e inclinação para SE de $24,3^\circ$, e a segunda (F2) do tipo normal, com direção do plano de falha de aproximadamente 186° , com mergulho de $42,3^\circ$ para NW. Deve-se notar que tais características das falhas são aproximadas, e deve-se verificar a presença das mesmas em estudos de campo.

Figura 5.15 – Modelo geológico e superfície das prováveis falhas geológicas previstas pelo modelo.



Fonte: O autor (2017)

5.3 Elaboração do Inventário Mineral de Teores

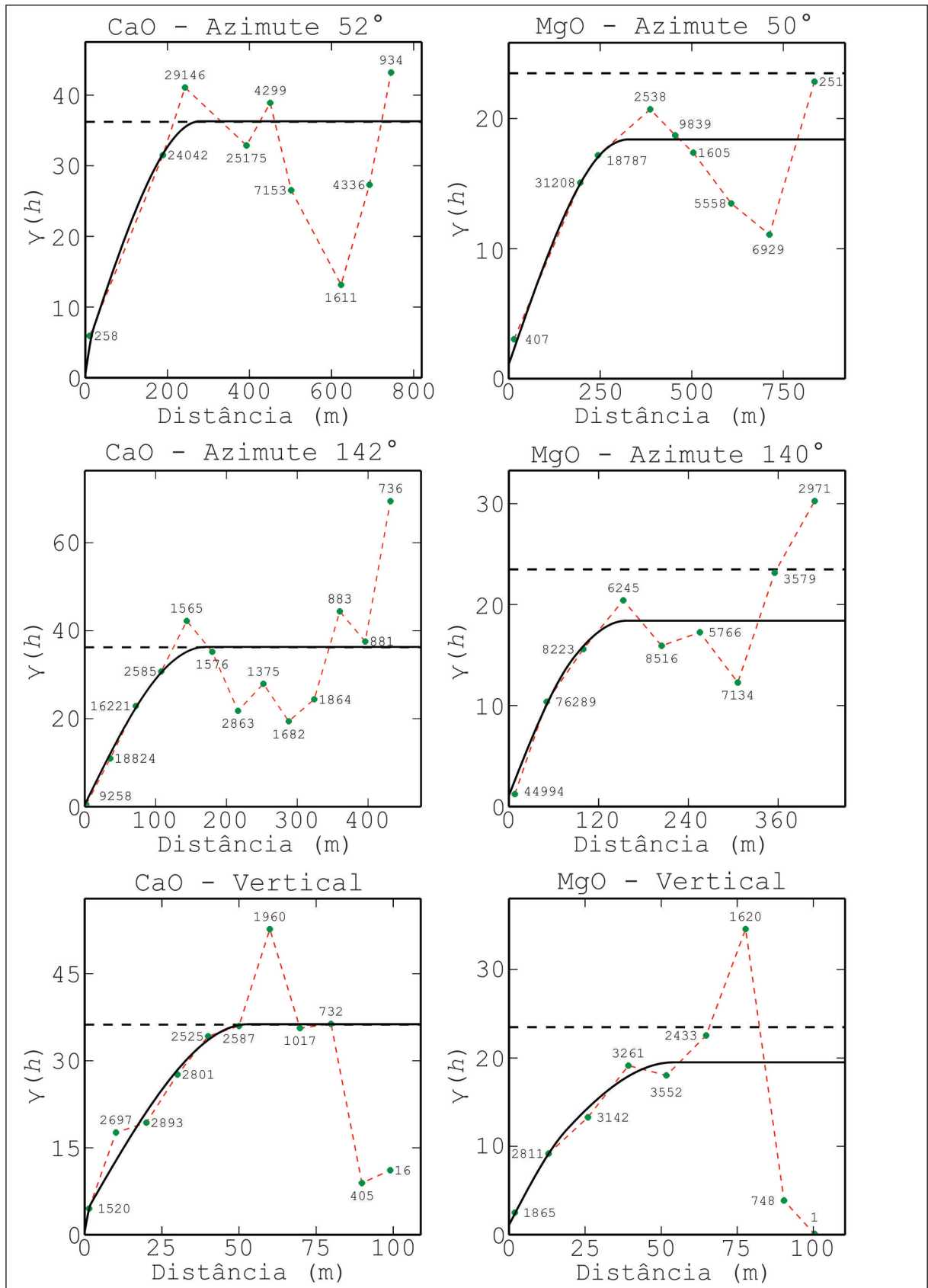
Como dito no capítulo anterior, o modelo geológico resultante foi a base sobre a qual fez-se as estimativas dos teores nos locais não amostrados, efetuada por meio do procedimento de krigagem denominado Krigagem Ordinária (KO), cujos parâmetros de continuidade das variáveis (CaO e MgO) foram estabelecidos através dos variogramas, estes calculados a partir dos dados regularizados (compositados). Os ajustes teóricos dos variogramas experimentais resultou nos modelos teóricos expostos na Figura 5.16, cujos parâmetros do ajuste (tipo de estrutura, alcance e patamar) se encontram na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Parâmetros dos ajustes variográficos para as variáveis CaO e MgO

Domínio	Orientação	Efeito Pepita	Estrutura 1			Estrutura 2		
			Modelo 1	Contribuição	Alcance	Modelo 2	Contribuição	Alcance
CaO	Azimute 52°	0,5	Esférico	3,0	20,0	Esférico	32,8	260,0
	Azimute 142°	0,5	Esférico	3,0	120,0	Esférico	32,8	50,0
	Vertical	0,5	Esférico	3,0	2,0	Esférico	32,8	51,0
MgO	Azimute 50°	1,1	Esférico	3,0	280,0	Esférico	14,3	48,0
	Azimute 140°	1,1	Esférico	3,0	87,0	Esférico	14,3	70,0
	Vertical	1,1	Esférico	3,0	19,0	Esférico	15,4	35,0

Fonte: O autor (2017)

Figura 5.16 – Variogramas experimentais (linha tracejada vermelha) e respectivos ajustes teóricos (linha contínua preta) dos óxidos CaO e MgO.

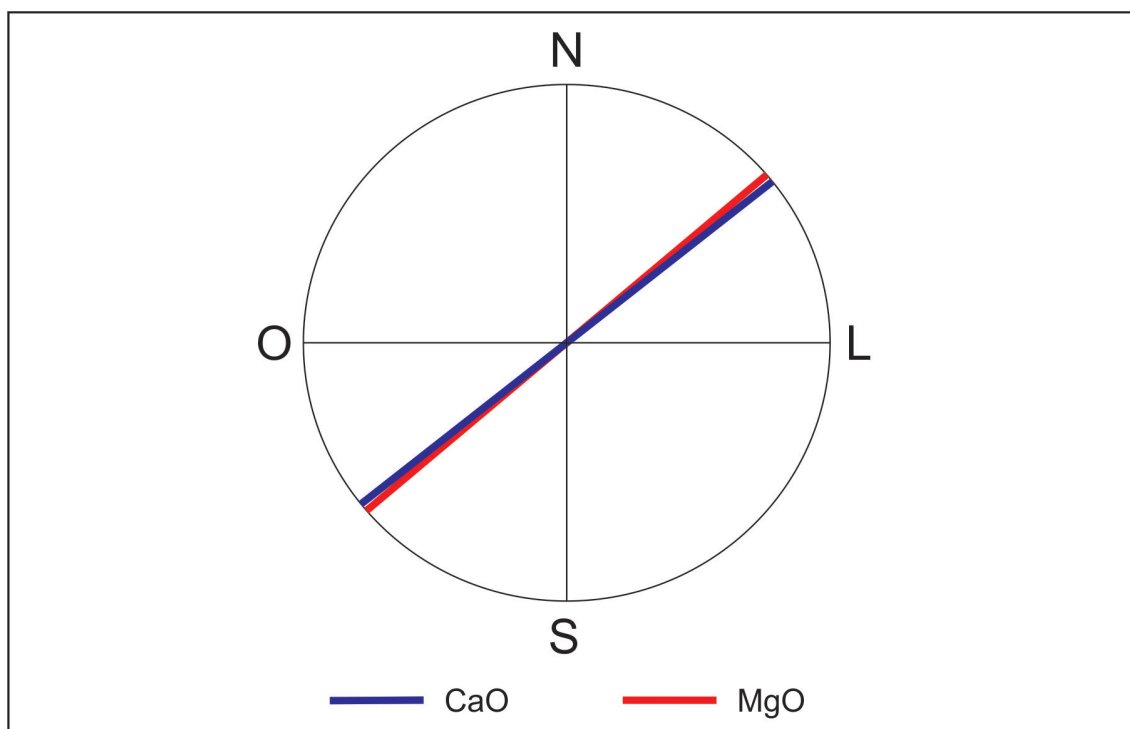


Fonte: O autor (2017)

Os variogramas experimentais, conforme se observa na Figura 5.16, mostraram, de maneira geral, crescimentos estáveis na origem, particularmente aqueles orientados para a direção SE, na qual se tem uma menor distância média entre furos de sondagem (amostras) em relação à direção perpendicular (NE), proporcionando, portanto, a obtenção de uma quantidade maior de pontos na origem do variograma em relação à outra direção. Quanto aos ajustes, obteve-se boa compatibilidade entre as curvas teóricas e as experimentais, o que foi facilitado pelo crescimento geralmente estável dos variogramas experimentais.

Os ajustes variográficos evidenciaram, de acordo com a Tabela 5.9, que as direções de maior e menor continuidade dos teores foram, respectivamente, os azimutes de 52° e 142° para a variável CaO, e os azimutes de 50° e 140° para a variável MgO. Tal fato indica que a direção mais contínua, para ambas as variáveis, é a direção NE (Figura 5.17), enquanto a perpendicular (SE) corresponde à menos contínua. Conforme pode-se observar também as razões de anisotropia são de 1,65:1 e 2,10:1 para os óxidos CaO e MgO, respectivamente, o que indica um maior nível de anisotropia para esta variável.

Figura 5.17 – Variáveis geológicas de teor e suas respectivas orientações espaciais de maior continuidade.

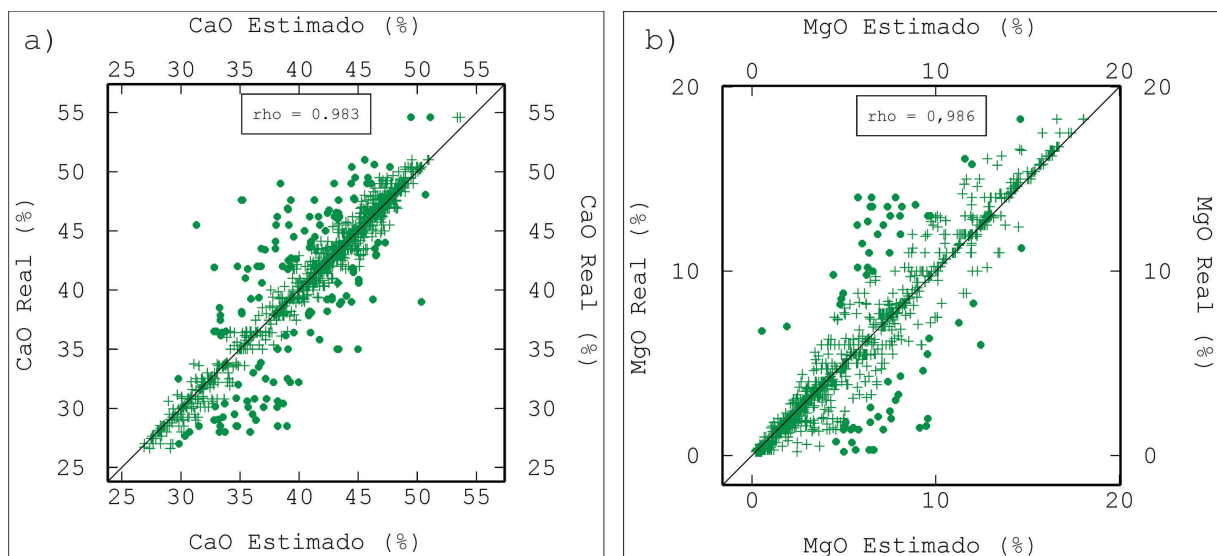


Fonte: O autor (2017)

A validação cruzada, a qual confronta teores reais e estimados nos mesmos pontos, efetuada a partir dos variogramas obtidos e baseada em estimativas pontuais (Figura 5.18), mostrou uma boa compatibilidade entre teores reais e estimados, com poucos desvios anormais (círculos verdes preenchidos) entre os mesmos, e com pontos distribuídos em torno da primeira bissetriz, onde os teores reais são iguais aos estimados, o que indica uma boa

representatividade dos variogramas. Na Figura 5.18a, atribuída à variável CaO, pode-se observar uma concentração maior de pontos em torno da primeira bissetriz em teores mais elevados, o que é uma consequência da maior proporção de amostras de calcário calcítico. Além disso, os desvios anormais observados representam somente uma pequena parte do total de pontos do diagrama. Quanto à variável MgO (Figura 5.18b), pode-se observar que, em relação à variável anterior, os pontos do diagrama, de uma maneira geral, encontram-se mais dispersos, indicando a ocorrência, em geral, de desvios mais elevados. Entretanto, os desvios anormais ocorrem em uma quantidade ainda menor que o observado no diagrama da variável CaO (Figura 5.18a). Os pontos atribuídos à variável MgO se encontram mais concentrados em teores mais baixos, consequência da maior presença de amostras de calcário calcítico, além das amostras de rochas não carbonáticas (VMV).

Figura 5.18 – Diagramas de validação cruzada para as variáveis CaO (a) e MgO (b).



Fonte: O autor (2017)

A quantificação do inventário mineral quanto aos teores e tonelagens em cada domínio geológico (Tabela 5.10) indicou um depósito constituído em grande parte de calcário calcítico, correspondendo a 63,26% do total, com, em média, 45,07% de CaO e 1,67% de MgO. Já os demais calcários, magnésiano e dolomítico, corresponderam a 10,38% e 7,99%, respectivamente. Portanto, tais resultados indicam o calcário calcítico como o tipo de calcário predominante no depósito.

A avaliação quanto às categorias de recursos minerais (Tabela 5.11) evidenciou que os recursos medidos e indicados, juntos, perfizeram 82,67% do total, e o restante, 17,33%, foi atribuído ao recurso inferido. Assim, observa-se uma pequena participação desta classe no total estimado, indicando que, em tese, uma grande parte das estimativas possuiria um nível de confiança moderado a alto, dada a grande participação das categorias de recursos medido e indicado no total estimado.

Tabela 5.10 – Valores de teores médios e tonelagens classificados de acordo com os domínios geológicos.

Domínio Litológico	Massa (t)	CaO (%)	MgO (%)	Massa Específica (t/m ³)
CLC	122.109.533,55	45,7	1,67	2,4
MAG	18.401.281,18	37,25	8,51	2,4
DOL	14.160.750,09	30,55	14,70	2,4
CLI	9.569.930,82	-	-	2,55
VMV	12.965.202,38	-	-	2,7
Total	177.206.698,02	42,81	3,62	2,43

Fonte: O autor (2017)

Tabela 5.11 – Valores de teores médios e tonelagens classificados de acordo com as categorias de recursos minerais.

Classe de Recurso	Massa (t)	CaO (%)	MgO (%)	Massa Específica (t/m ³)
Medido	63.346.191,95	42,79	3,44	2,4
Indicado	64.515.817,17	43,08	3,33	2,4
Inferido	26.809.555,70	42,22	4,74	2,4
Total	154.671.564,82	42,81	3,62	2,4

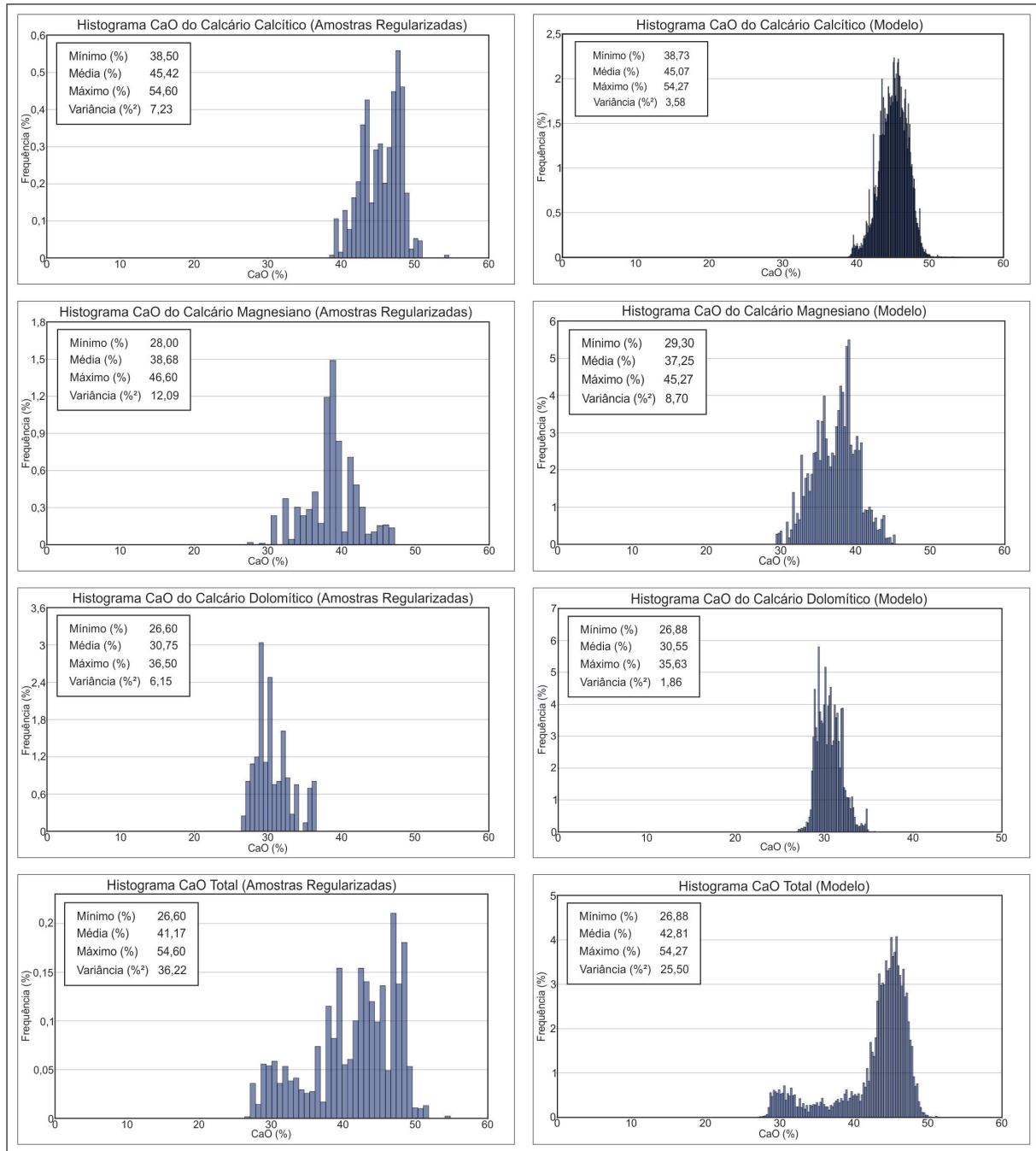
Fonte: O autor (2017)

O cenário observado, entretanto, pode ser alterado, uma vez que não foram estimadas as unidades CLI e VMV, tanto pelo fato destas corresponderem a material estéril, e, portanto, não aproveitáveis comercialmente, quanto por representarem apenas uma pequena parte do total amostrado, o que tornaria a elaboração e ajuste dos variogramas tarefas muito especulativas, senão impossíveis, dado a existência de grandes valores de distâncias separando pares de amostras. A estimativa dos teores de CaO e MgO em tais domínios litológicos provocaria um aumento da quantidade de recursos inferidos, alterando, portanto, o cenário apresentado na Tabela 5.11.

No que tange aos teores médios das categorias, observa-se pela Tabela 5.11 que os teores médios de CaO e MgO estão compatíveis com os teores característicos do domínio do calcário calcítico, o que é consequência da expressiva participação desta unidade no total estimado (Tabela 5.10).

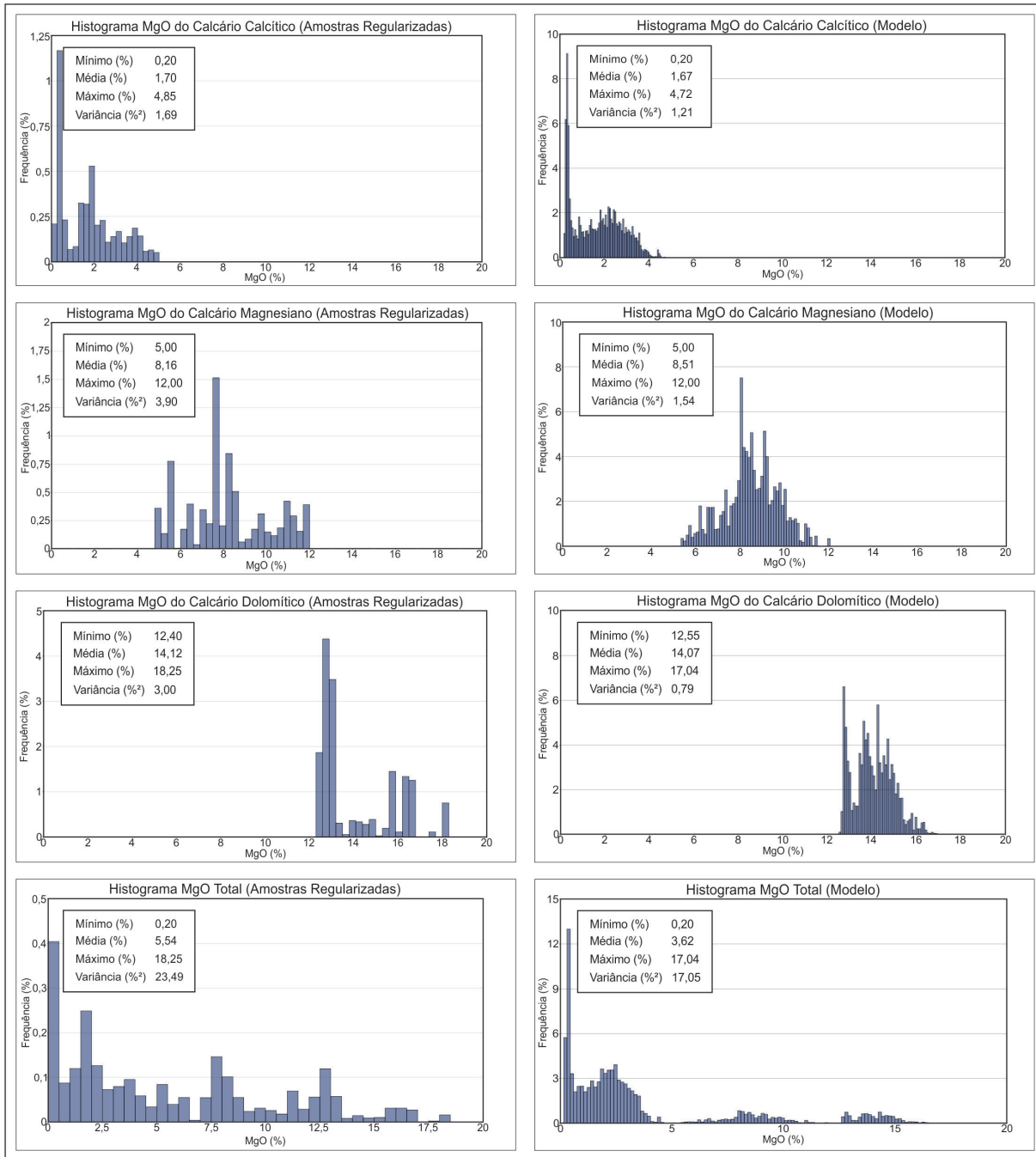
A análise comparativa entre as estatísticas do modelo de teores obtido e as amostras regularizadas, de cada variável, e para cada domínio litológico (Figura 5.19 e Figura 5.20), mostrou que os teores médios do modelo, em cada domínio litológico, estão compatíveis com os respectivos teores médios reais, o mesmo sendo aplicado ao formato das distribuições estatísticas, notadamente as relacionadas à variável CaO (Figura 5.19), as quais mostraram formatos similares ao observado nas respectivas distribuições dos dados amostrais. Note-se também que em todas as estimativas houve um aumento dos teores mínimos e diminuição dos teores máximos, acompanhados de uma diminuição da variância de dispersão, o que é consequência da suavização, característica do procedimento de estimativa por krigagem.

Figura 5.19 – Histogramas dos dados amostrais e do modelo de teores para a variável CaO com classificação por domínio litológico.



Fonte: O autor (2017)

Figura 5.20 – Histogramas dos dados amostrais e do modelo de teores para a variável MgO com classificação por domínio litológico.



Fonte: O autor (2017)

Comparando os resultados (média e variância) do modelo de cada unidade litológica, para cada variável (CaO e MgO), com os respectivos limites inferior e superior estabelecidos a partir do cálculo dos intervalos de confiança ao nível de 95% (Tabela 5.12 e Tabela 5.13), nota-se que todos os teores médios atribuídos ao modelo geológico estimado estão situados dentro dos respectivos intervalos de existência dos teores médios, definidos a partir dos dados amostrais. Portanto, os teores médios estimados representaram adequadamente os dados amostrais.

Tabela 5.12 – Comparativo entre estatísticas amostrais e do modelo de teores para a variável CaO.

Domínio	Parâmetros	Amostras	Modelo	Limite Inferior	Limite Superior
CLC	Mínimo (%)	38,50	38,73	-	-
	Média (%)	45,42	45,07	44,87	45,62
	Máximo (%)	54,60	54,27	-	-
	Variância (%) ²	7,23	3,58	7,00	10,10
MAG	Mínimo (%)	28,00	29,30	-	-
	Média (%)	38,68	37,25	36,96	38,99
	Máximo (%)	46,60	45,27	-	-
	Variância (%) ²	12,09	8,70	14,86	28,18
DOL	Mínimo (%)	26,60	26,88	-	-
	Média (%)	30,76	30,55	29,74	31,24
	Máximo (%)	36,50	35,63	-	-
	Variância (%) ²	6,15	1,86	4,49	10,25

Fonte: O autor (2017)

Tabela 5.13 – Comparativo entre estatísticas amostrais e do modelo de teores para a variável MgO.

Domínio	Parâmetros	Amostras	Modelo	Limite Inferior	Limite Superior
CLC	Mínimo (%)	0,20	0,20	-	-
	Média (%)	1,71	1,67	1,42	1,77
	Máximo (%)	4,85	4,72	-	-
	Variância (%) ²	1,69	1,21	1,57	2,26
MAG	Mínimo (%)	5,00	5,00	-	-
	Média (%)	8,17	8,51	7,74	8,72
	Máximo (%)	12,00	12,00	-	-
	Variância (%) ²	3,89	1,54	3,50	6,65
DOL	Mínimo (%)	12,40	12,55	-	-
	Média (%)	14,12	14,07	13,60	14,47
	Máximo (%)	18,25	17,04	-	-
	Variância (%) ²	3,00	0,79	1,50	3,43

Fonte: O autor (2017)

As variâncias dos dados estimados, em cada variável, mostraram-se, todas, fora dos limites estabelecidos pelos intervalos de confiança, notadamente menores que os respectivos limites inferiores, o que evidencia que as estimativas das unidades litológicas resultaram em modelos cujas distribuições estatísticas possuem uma dispersão muito menor que a dos dados amostrais. Entretanto, tal fato se deve à suavização das estimativas, ou seja, diminuição da dispersão (variância) dos teores estimados, atribuída ao procedimento de krigagem. Esta, por definição, sobrestima teores baixos e subestima teores elevados, resultando, portanto, em modelos com dispersão menor em relação aos dados amostrais.

O gráfico Q-Q (*Q-Q Plot*) da variável CaO (Figura 5.21), o qual compara os quantis das distribuições estatísticas dos dados estimados e amostrais, mostra que somente na uni-