



Remineralizadores na Gestão Sustentável de Solos

Eder de Souza Martins

Agrogeólogo

(061)99209-8726

<http://lattes.cnpq.br/8160265101709215>

eder.martins@embrapa.br



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



Plano da Apresentação

- Agrominerais regionais e remineralizadores de solos
- Potencial dos remineralizadores de solos na gestão ambiental
- Zoneamento Agrogeológico

Definições

AGROMINERAL

Matéria prima mineral para a produção de insumos
destinados ao manejo da fertilidade do solo

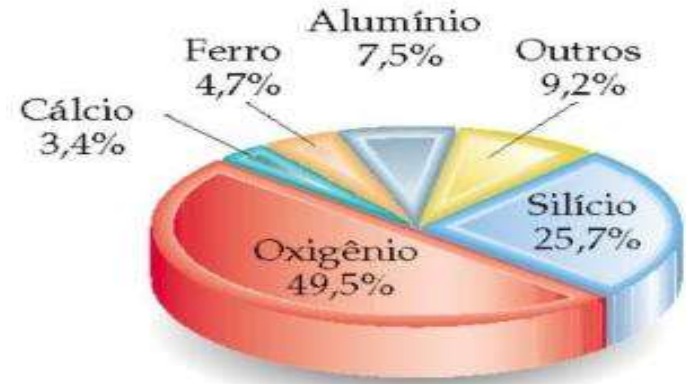
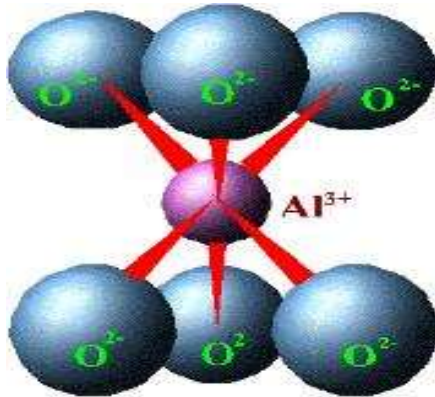
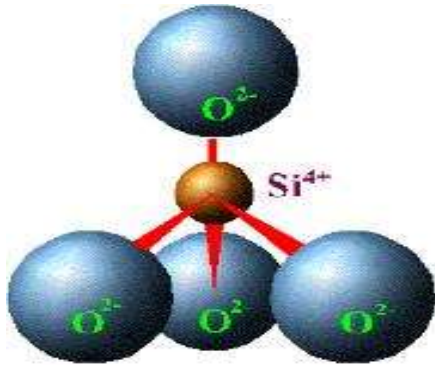
Tipos de agrominerais

| Classe de ânion | | Tipo de rochas* | Cátions principais | Cobertura da crosta (% área) ¹⁰ | Solubilidade em água |
|-----------------|--------------------------------|--|--|--|----------------------|
| Carbonato | CO ₃ ²⁻ | Calcário (sedimentar) ¹ Carbonatito (ígneo) ² Mármore (metamórfico) ³ | Ca ²⁺ , Mg ²⁺ | 10,0 | Baixa |
| Sulfato | SO ₄ ²⁻ | Depósitos evaporíticos (sedimentar) ⁴ | Ca ²⁺ , K ⁺ | 0,0 | Muito alta |
| Cloreto | Cl ⁻¹ | Depósitos evaporíticos (sedimentar) | K ⁺ | 0,0 | Muito alta |
| Fosfato | PO ₄ ³⁻ | Fosforito (sedimentar) ⁵ Foscorito (ígneo) ⁶ | Ca ²⁺ | 0,0 | Baixa |
| Silicato | SiO ₄ ⁴⁻ | Sedimentar ⁷ | Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺ | 90,0 | Muito baixa |
| | | Ígneo ⁸ | | | |
| | | Metamórfico ⁹ | | | |



*Exemplos de pesquisa com agrominerais *in natura*: ¹Sousa et al. (1989); ²Andrade et al. (2002); ³Raymundo et al. (2013); ⁴Freire et al. (2014); ⁵Chaves et al. (2013); ⁶Resende et al. (2006); ⁷Lopes (1971); ⁸Mancuso et al. (2014); ⁹Duarte et al. (2012).
¹⁰Scoffin (1987).

Química das rochas



Crosta terrestre

$$\text{O} + \text{Si} + \text{Al} = 82,4\%$$

Soluções Regionais

- ✓ Uso de agrominerais regionais *in natura*
- ✓ Uso de agrominerais regionais derivados de processos industriais (químicos, bioquímicos e físicos)
- ✓ Uso de bioestimulantes, biofertilizantes e biochar de resíduos agroindustriais e urbanos
- ✓ Manejo dos microbiomas do solo e das plantas

Estabilidade dos Minerais

Energia livre de Gibbs de dissolução por hidrólise ($-\Delta G_{sol}$) dos principais minerais formadores de rochas silicáticas. Os menores valores são relativos aos minerais mais estáveis.

| Mineral de rocha | Composição química | Classe mineral | $-\Delta G_{sol}$ (kJ mol ⁻¹) |
|--------------------------------|---|----------------|--|
| <i>Quartzo</i> ¹ | SiO ₂ | Tectossilicato | -261 |
| <i>Ortoclásio</i> ¹ | KAlSi ₃ O ₈ | Tectossilicato | 13,7 |
| <i>Albita</i> ¹ | NaAlSi ₃ O ₈ | Tectossilicato | 65,6 |
| <i>Muscovita</i> ¹ | KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂ | Filossilicato | 178 |
| <i>Biotita</i> ² | KMg ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂ | Filossilicato | 368,7 |
| <i>Anortita</i> ¹ | CaAl ₂ Si ₂ O ₈ | Tectossilicato | 478 |
| <i>Anfibolio</i> ¹ | Ca ₂ Mg ₄ Al(Al ₈ Si ₄ O ₂₂)(OH) ₂ | Inossilicato | 495 |
| <i>Piroxênio</i> ¹ | CaMgAlSiO ₃ | Inossilicato | 537 |
| <i>Olivina</i> ¹ | Mg ₂ SiO ₄ | Nesossilicato | 977 |

¹Wieland et al. (1988); ²Tardy e Duplay (1992)

Dissolução de Agrominerais

Dissolução congruente

Dissolução total; todos os componentes dissolvidos em água

- ☐ Carbonato – CO_4^{2-} , Ca^{2+} e Mg^{2+}
- ☐ Sulfato – SO_4^{2-} e Ca^{2+} (Mg^{2+} , K^+)
- ☐ Cloreto – Cl^- e K^+

Dissolução total

Agromineral
silicático

- ☐ Silicato – H_3SiO_4^- e Ca^{2+} (Mg^{2+})

Dissolução incongruente

- ☐ Aluminossilicato - H_3SiO_4^- e Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+

Dissolução parcial

Dissolução parcial de H_3SiO_4^- e Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ ; formação de argilominerais 2:1

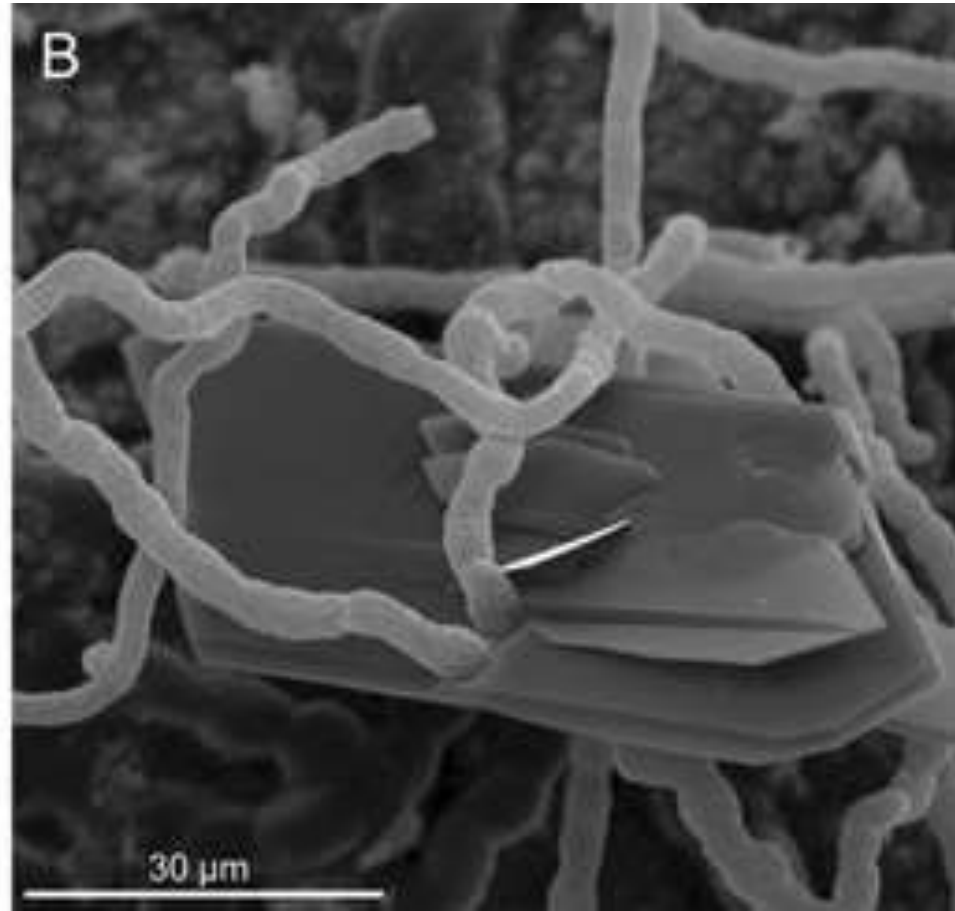
Alta CTC e elevada carga negativa permanente

Biointemperismo



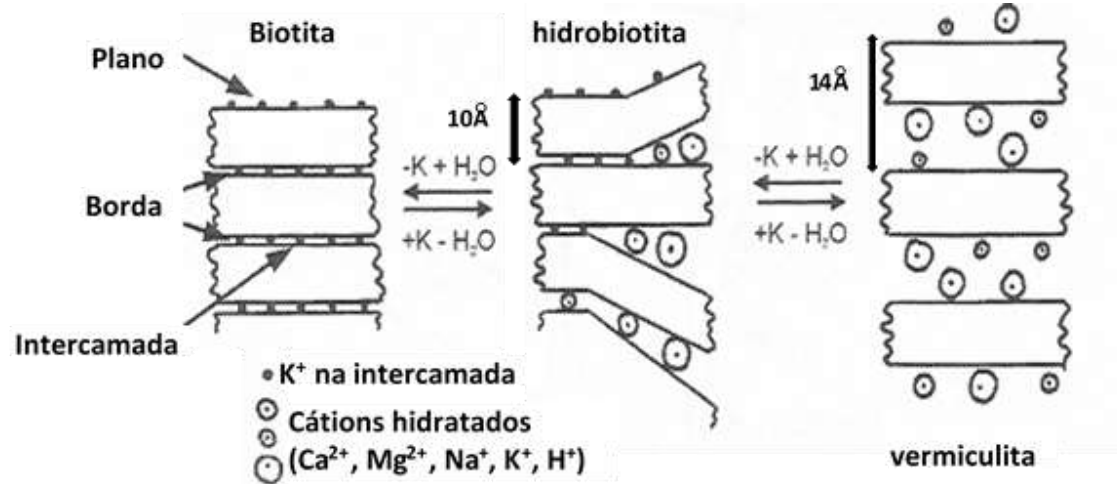
Biointemperismo

Fonte: Bonneville et al
(2011) Tree-mycorrhiza
Symbiosis accelerate
mineral weathering. *Geoch.
Cosmoch. Acta*, 75:6988-
7005



Biointemperismo

Biotita \Rightarrow Vermiculita + K (+Si +Mg +Fe)



Fonte: Van Straaten (2007)

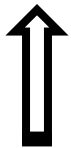
Geração de CTC por biointemperismo

Biointemperismo de mica xisto

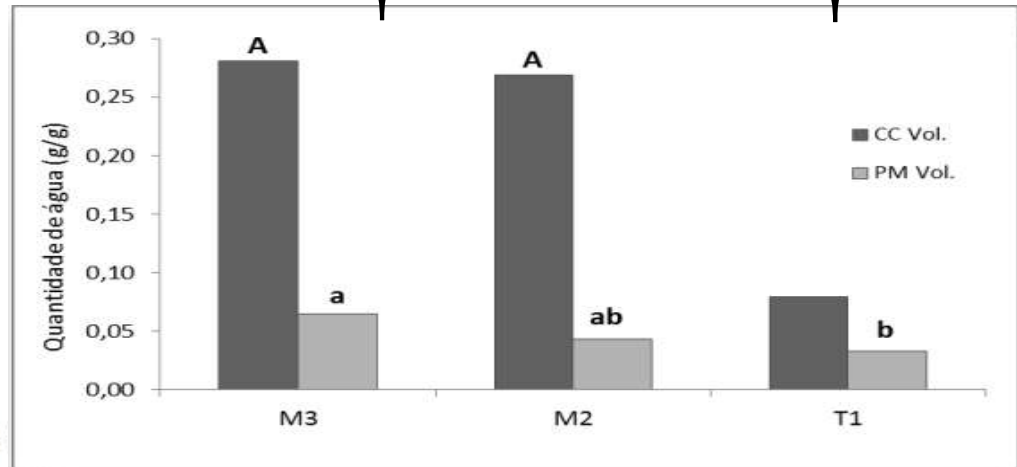
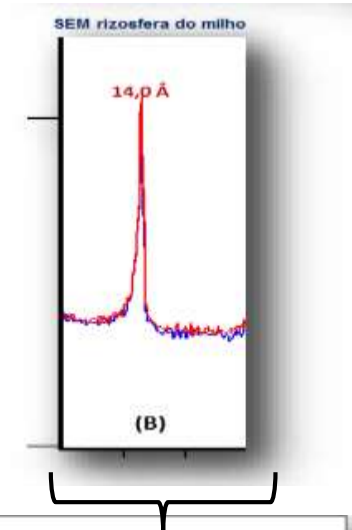
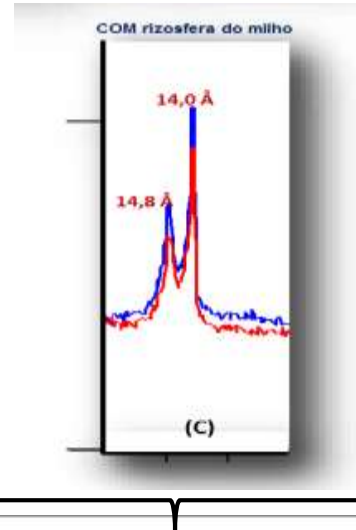
Vermiculita



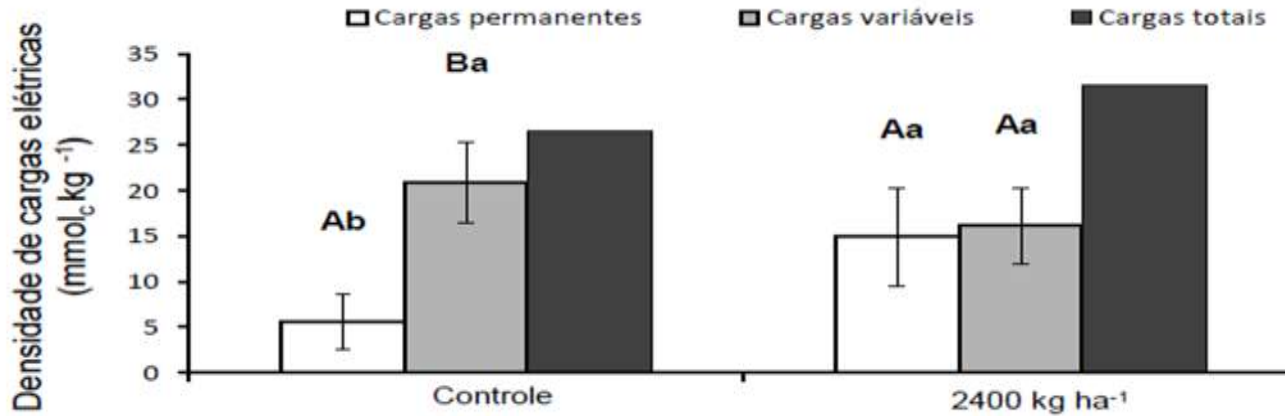
Hidrobiotita



Biotita

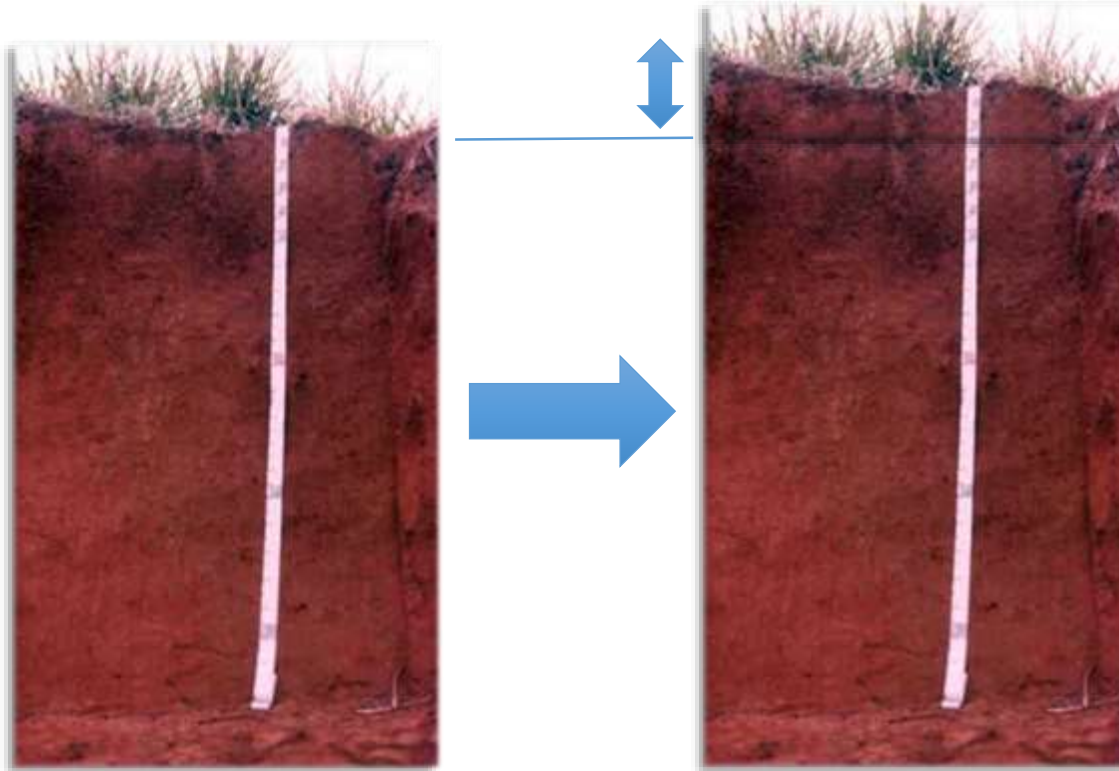


Formação de carga superficial



SANTOS, L.F.; RODRIGUES, L.M.; MACHADO, L.L.; MOL, A.R.; SODRÉ, F.F.; BUSATO, J.G. CUNHA, J.C.; RUIZ, H.A.; FREIRE, M.B.G.; ALVAREZ, V.H.; FERNANDEZ, R.B. (2015) Cargas elétricas e liberação de nutrientes num Latossolo sob adição de sienito finamente moído. XXXV CBCS, Natal-RN, Resumos. Disponível: <http://www.cbcs2015.com.br/anais/index.php#menuanais>

Formação de solo



1 cm a cada 50 ou 100 anos
(1 a 2 toneladas por ano)

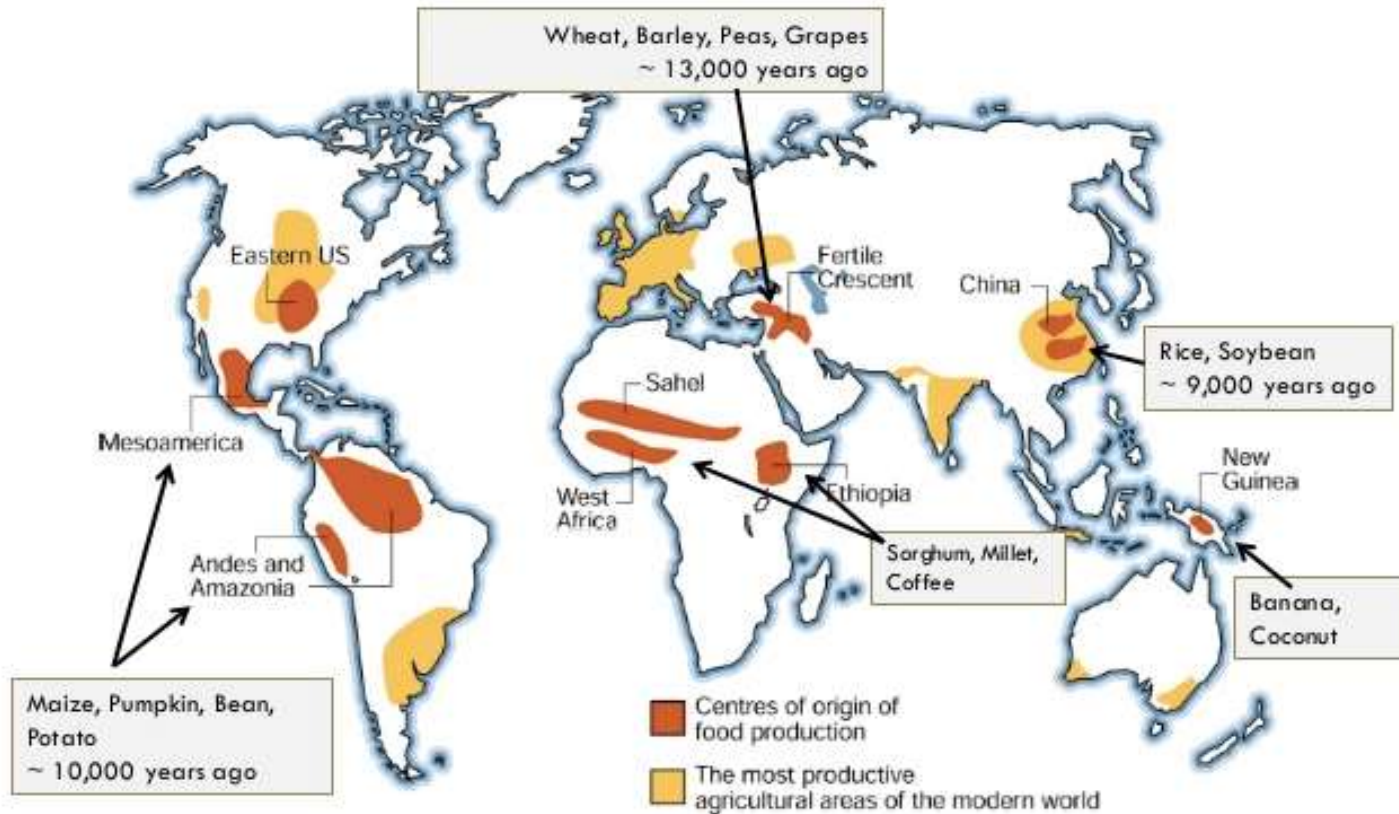
Processo natural:
1 cm a cada 1.000 anos

Interação entre silicatos e plantas



Fonte: Embrapa Cerrados 2017

Centros de origem de plantas e silicatos



Fonte: Gruissen (2013) A coalition of plant and crop societies across the Globe

Instruções Normativas do MAPA

REMINERALIZADOR DE SOLO

Regulamentação da Lei 12890/2013

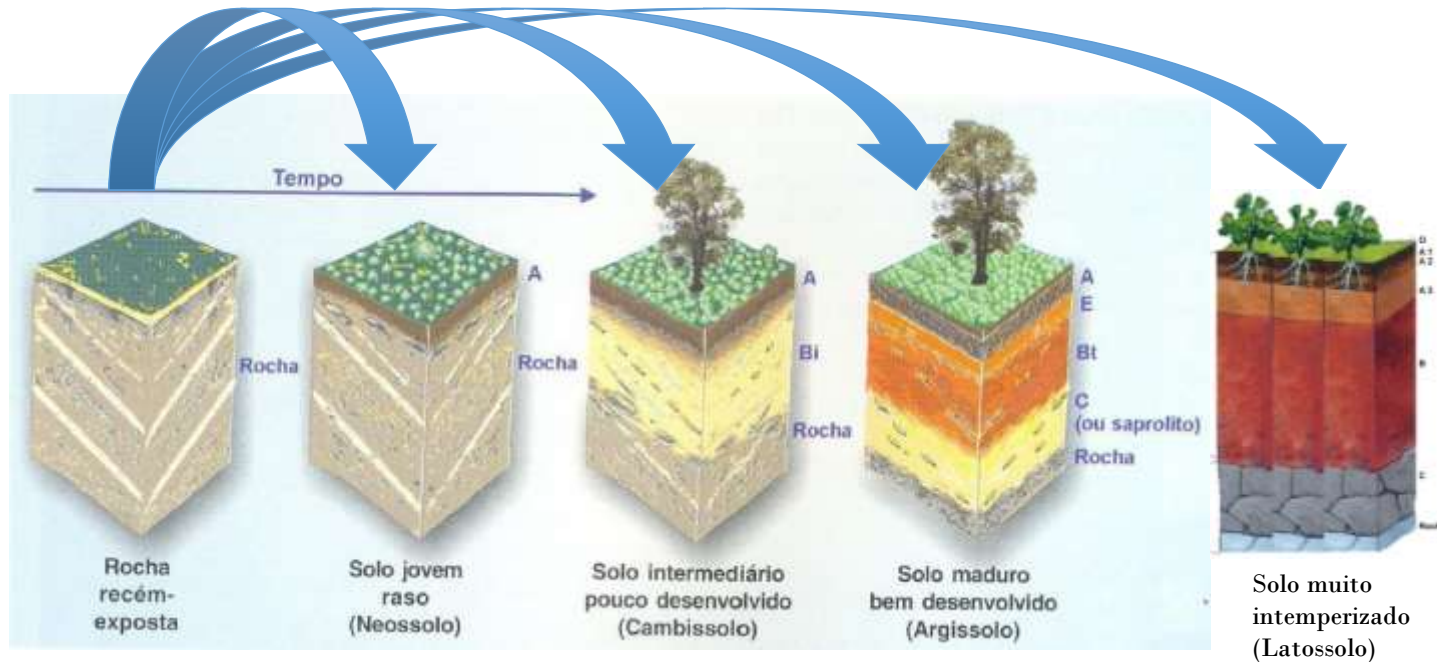
IN 05 e IN 06/2016 publicado em 14/03/2016 altera a
Instrução Normativa Nº 14, de 15 de dezembro de 2004
de substratos e inclui os remineralizadores



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



Remineralizador de Solo



Instrução Normativa nº 5, de 24 de março de 2016

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

GABINETE DA MINISTRA

INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 5, DE 10 DE MARÇO DE 2016

A MINISTRA DE ESTADO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, no uso das atribuições que lhe confere o art. 87, parágrafo único, inciso II, da Constituição, tendo em vista o disposto no art. 3º do Anexo do Decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004, e o que consta do Processo nº 21000.003626/2015-32, resolve:

Art. 1º Ficam estabelecidas as regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura.

Seção III

Especificações e Garantias do Produto

Subseção I

Remineralizadores

Art. 4º Os remineralizadores deverão apresentar as seguintes especificações e garantias mínimas:

I - em relação à especificação de natureza física, nos termos do Anexo I desta Instrução Normativa;

II - em relação à soma de bases (CaO, MgO, K₂O), deve ser igual ou superior a 9% (nove por cento) em peso/peso;

III - em relação ao teor de óxido de potássio (K₂O), deve ser igual ou superior a 1% (um por cento) em peso/peso; e

IV - em relação ao potencial Hidrogeniônico (pH) de abração, valor conforme declarado pelo registrante.

§ 1º Quando os remineralizadores contiverem naturalmente o macronutriente fósforo e micronutrientes, os seus teores podem ser declarados somente se forem iguais ou superiores aos valores expressos no Anexo II desta Instrução Normativa.

§ 2º Não serão registrados no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA, ficando vedadas a produção, importação e comercialização no país de remineralizadores que contiverem:

I - em relação ao SiO₂ livre presente no produto, teor superior a 25% (vinte e cinco por cento) em volume/volume; e

II - em relação aos elementos potencialmente tóxicos presentes no produto, teores superiores a:

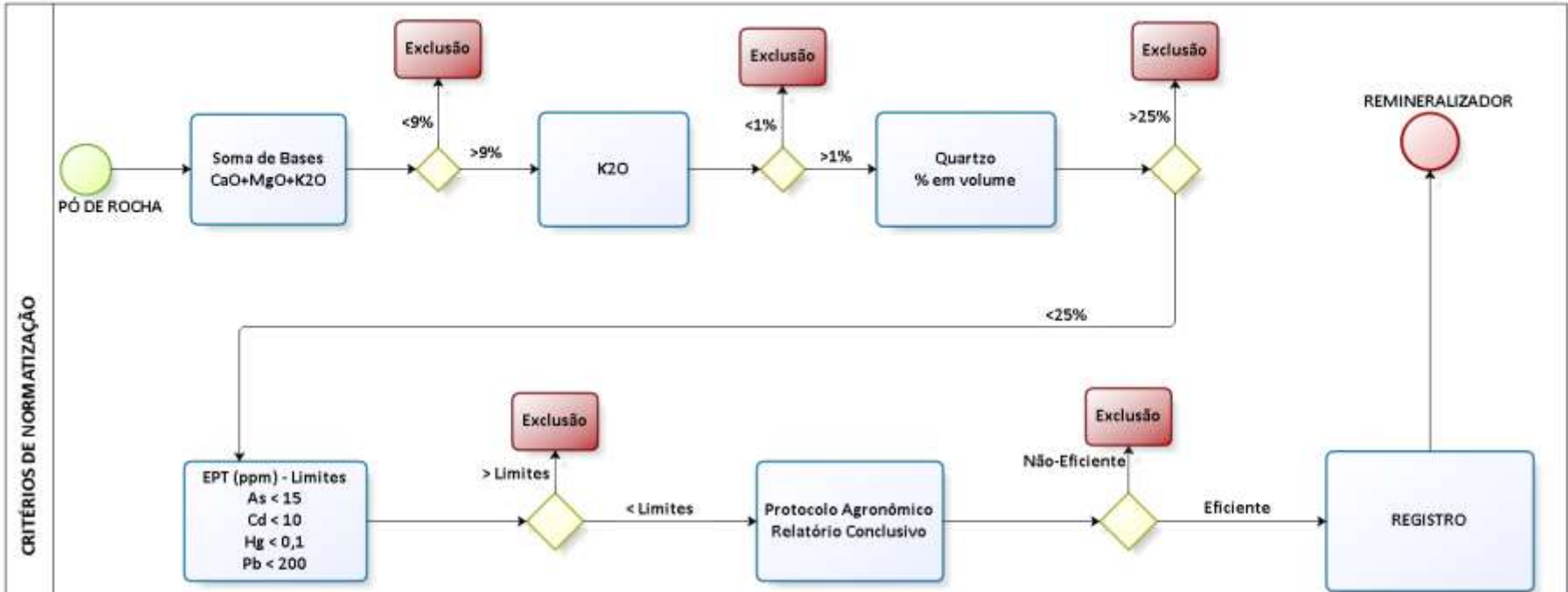
a) para Arsênio (As): 15 ppm;

b) para Cádmiu (Cd): 10 ppm;

c) para Mercúrio (Hg): 0,1 ppm; e

d) para Chumbo (Pb): 200 ppm.

Critérios para Registro no MAPA



FLUXOGRAMA – Etapas de avaliação para registro

1. Soma de bases – mínimo 9%
2. K_2O – mínimo 1%
3. Quartzo – máximo 25%
4. Limites máximos de EPT em ppm (As<15, Cd<10, Hg<0,1, Pb<200)
5. Granulometria – farelado, pó ou filler; 6. pH de abrasão
7. Protocolo agrônomo (avaliação da eficiência agrônomo)

Agrominerais Silicáticos

Cálcio e Magnésio

Rochas ultramáficas – ricas em olivina, piroxênio, serpentina. Alto Mg, Fe, Ni e Cr (**Serpentinito**)

Rochas ultramáficas alcalinas – ricas em olivina, piroxênio, feldspatoides. Alto Mg, Ca, K, Fe
(**Kamafugito**)

Rochas básicas – ricas em olivina, piroxênio, plagioclásio. Alto Mg, Ca, Fe (**Basalto, Diabásio, Gabro**)

Rochas sedimentares – ricas em argilominerais 2:1 (esmectitas, vermiculita). (**Folhelhos, Siltitos**)

Potássio

Rochas alcalinas – ricas em feldspatos e feldspatoides. Pode ter alto Na (**Fonolito, Nefelina sienito**)

Rochas metamórficas – ricas em biotita. Pode ter bases variáveis e quartzo elevado (**Gnaisses, Xistos**)

Rochas ultramáficas alcalinas – ricas em olivina, piroxênio, feldspatoides. Alto Mg, Ca, K, Fe
(**Kamafugito**)

Rochas sedimentares ou residual – ricas em argilominerais 2:1 (glaucônita, esmectitas, vermiculita).
(**Folhelhos, Siltitos, Saprólitos**)

Minerais de K

☐ Solubilidade alta:

Silvita: KCl ($\approx 60\% \text{K}_2\text{O}$)

Cloretos e sulfatos complexos de K-Mg

☐ Solubilidade moderada:

Flogopita: $\text{KMg}_3\text{Al}(\text{OH})\text{Si}_4\text{O}_{10}$ ($\approx 10\text{-}15\% \text{K}_2\text{O}$)

Biotita: $\text{K}_2(\text{Mg,Fe})_2(\text{OH})_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$ ($\approx 10\% \text{K}_2\text{O}$)

Leucita: $\text{KAl}(\text{SiO}_3)_2$ ($\approx 15\text{-}20\% \text{K}_2\text{O}$)

Nefelina: $(\text{Na,K})(\text{Al,Si})_2\text{O}_4$ ($\approx 5\text{-}10\% \text{K}_2\text{O}$)

Kalsilita: KAlSiO_4 ($\approx 25\text{-}30\% \text{K}_2\text{O}$)

Minerais de K

☐ Solubilidade baixa:

Glauconita: $\text{KMg}(\text{Fe,Al})(\text{SiO}_3)_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ($\approx 10\text{-}15\% \text{ K}_2\text{O}$)

☐ Solubilidade muito baixa:

Feldspatos alcalinos: $(\text{K,Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$ ($\approx 5\text{-}15\% \text{ K}_2\text{O}$)

Muscovita: $\text{KAl}_2(\text{OH})_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$ ($\approx 5\text{-}10\% \text{ K}_2\text{O}$)

Agrominerais regionais

Material carbonoso e Enxofre

Rochas sedimentares – ricas em argilominerais, material carbonoso e enxofre
(Turfa, Folhelho betuminoso, Antracito)

Enxofre

Rochas sedimentares e metamórficas – resíduos derivados de petróleo (enxofre elementar), de mineração de metais, carvão e folhelho betuminoso (pirita)

Fósforo

Rochas sedimentares e ígneas – fosfatos

Testes Agronômicos

Caracterização agronômica

Ensaio de Laboratório

Casa de vegetação

Campo

Resende et al. (2012) Protocolo de avaliação agronômica de rochas. **Embrapa Milho e Sorgo**, **Documentos**, 143, 30 p.

Documentos

ISSN 1618-4237
Outubro, 2012

143

Protocolo de Avaliação Agronômica
de Rochas e Produtos Derivados
como Fontes de Nutrientes às
Plantas ou Condicionadores de Solo



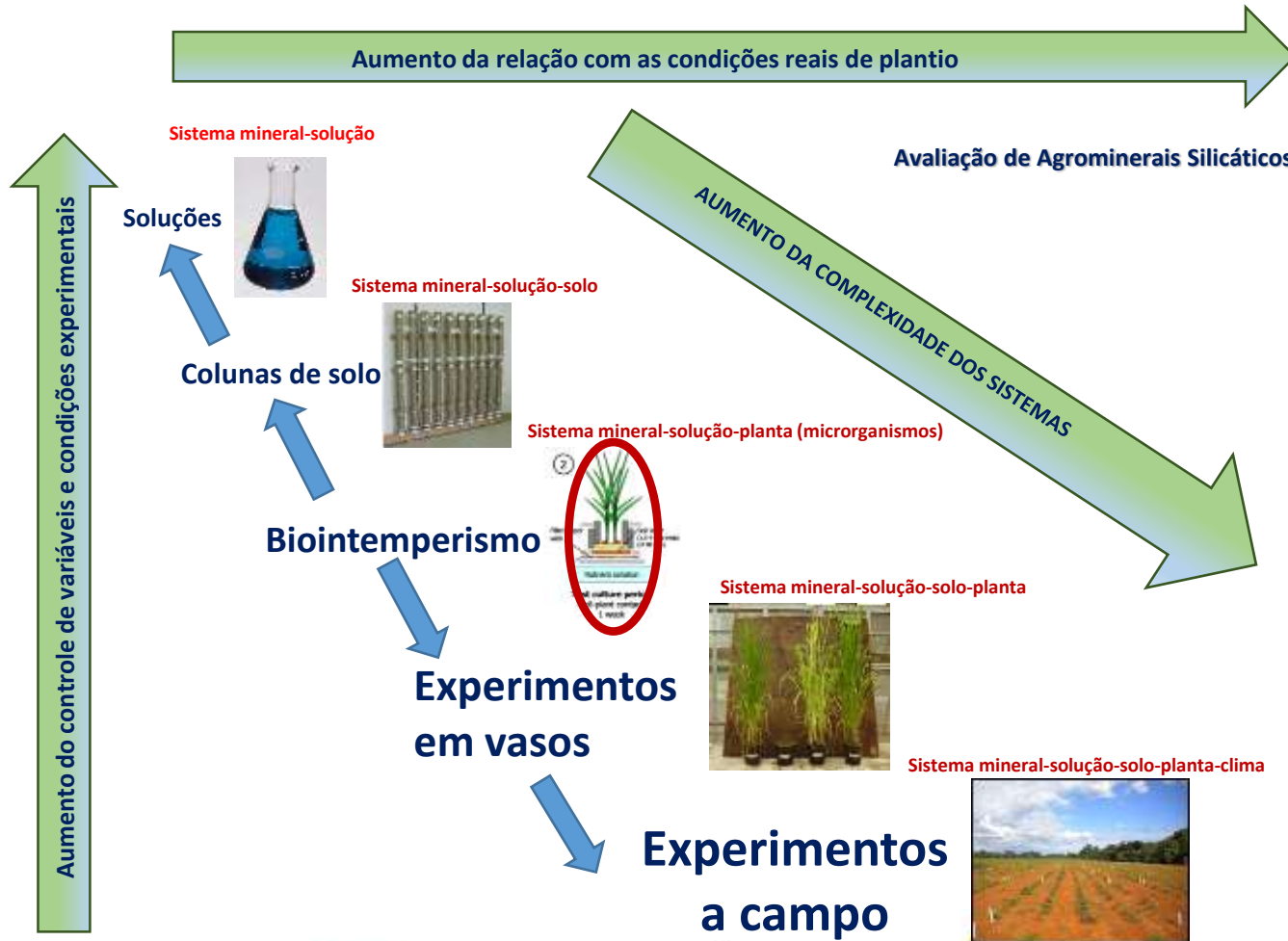
Proposta de Protocolo da Embrapa após Legislação e Normatização

Silveira et al. (2016) Protocolo para avaliação da eficiência agrônômica de remineralizadores de solos. III Congresso Brasileiro de Rochagem.

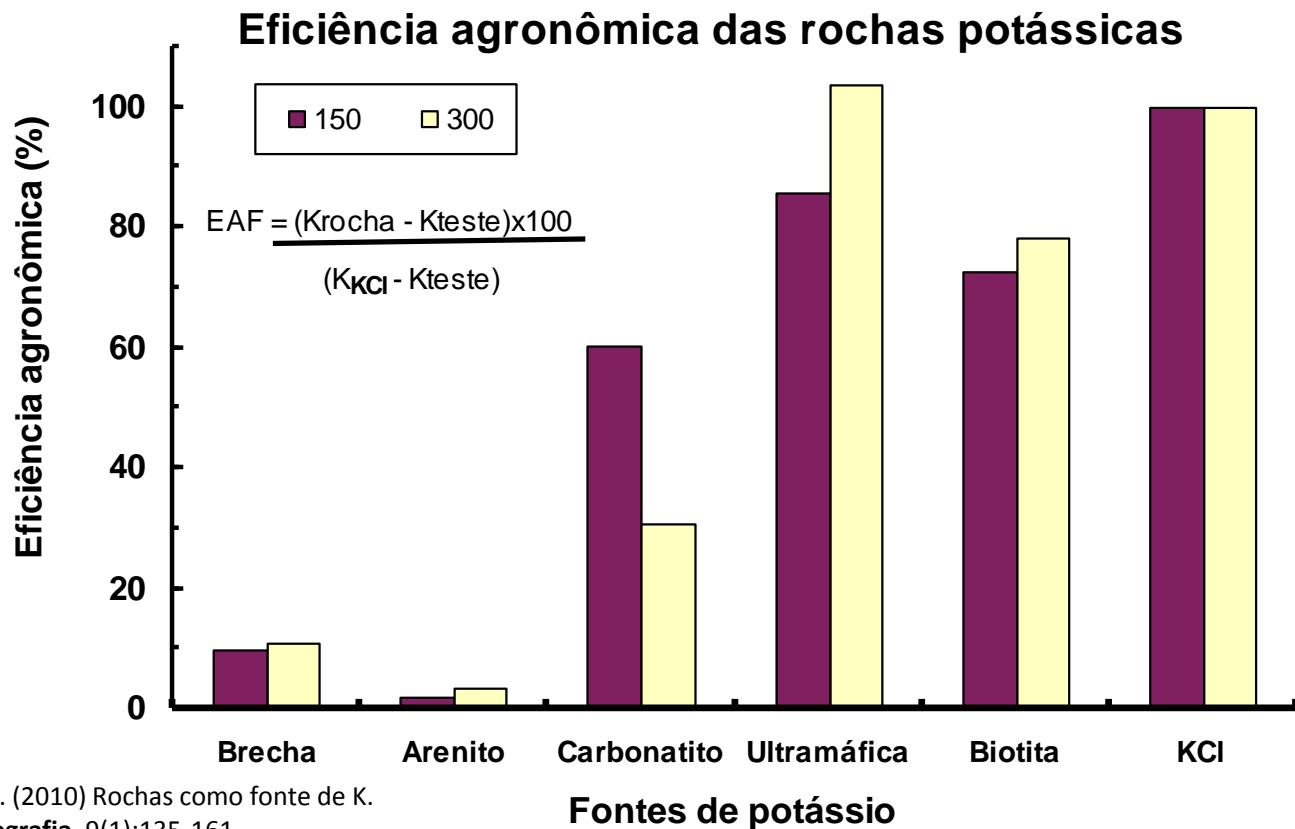


MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO

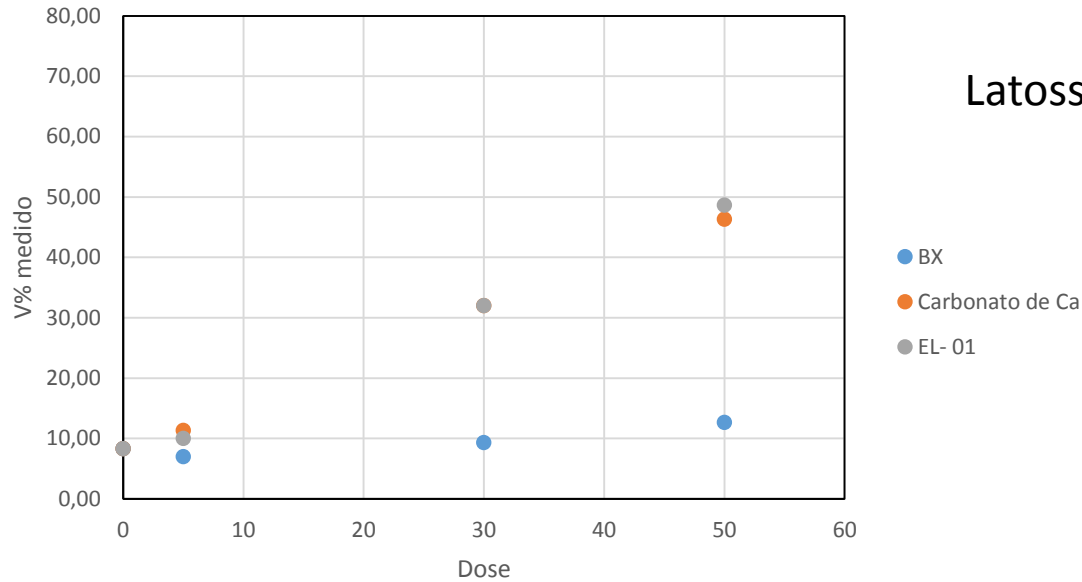




Eficiência Agronômica de Agrominerais Potássicos

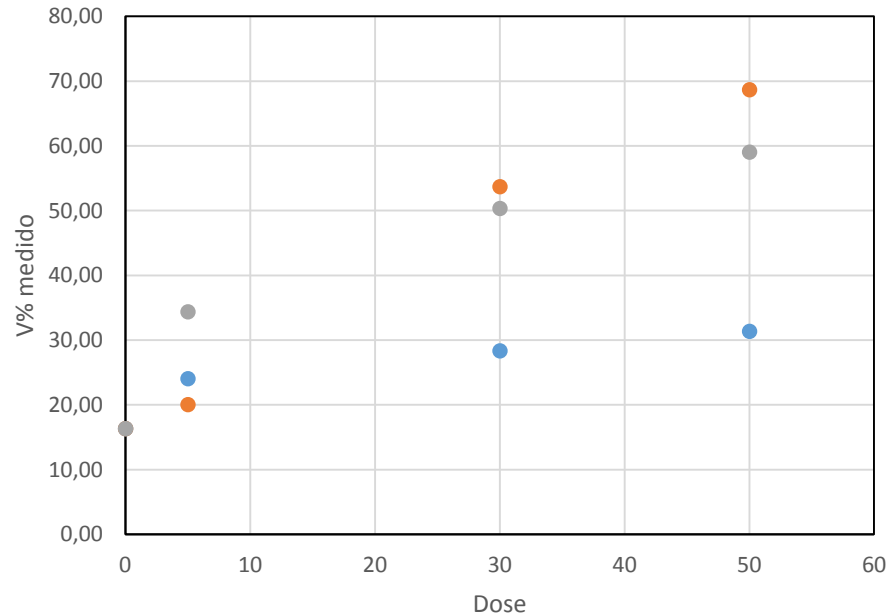


Incubação de Kamafugito em solo



Embrapa Cerrados (2017)

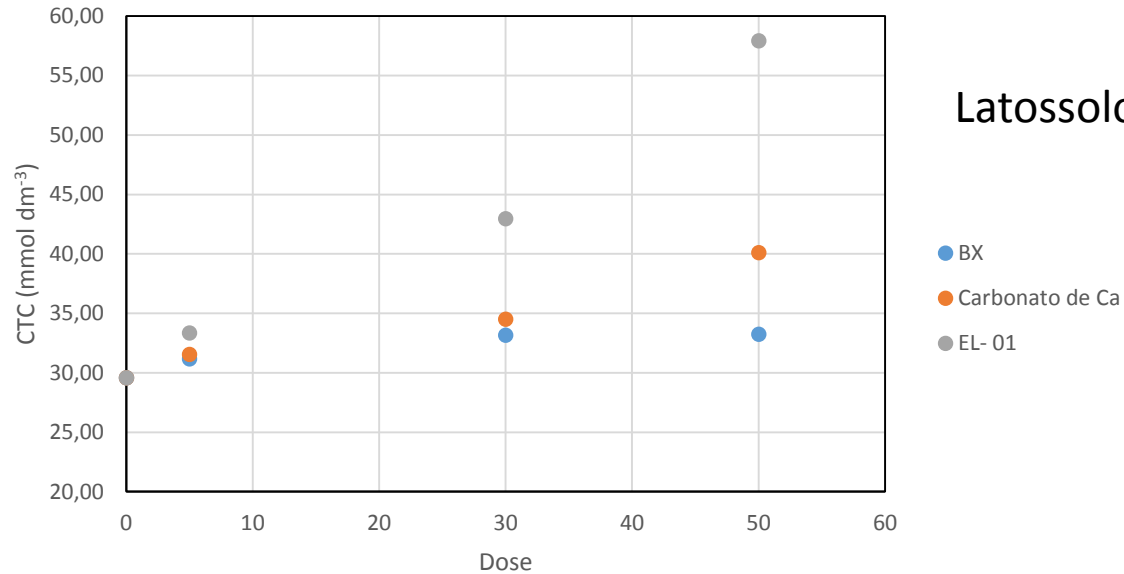
Incubação de Kamafugito em solo



Latossolo argiloso

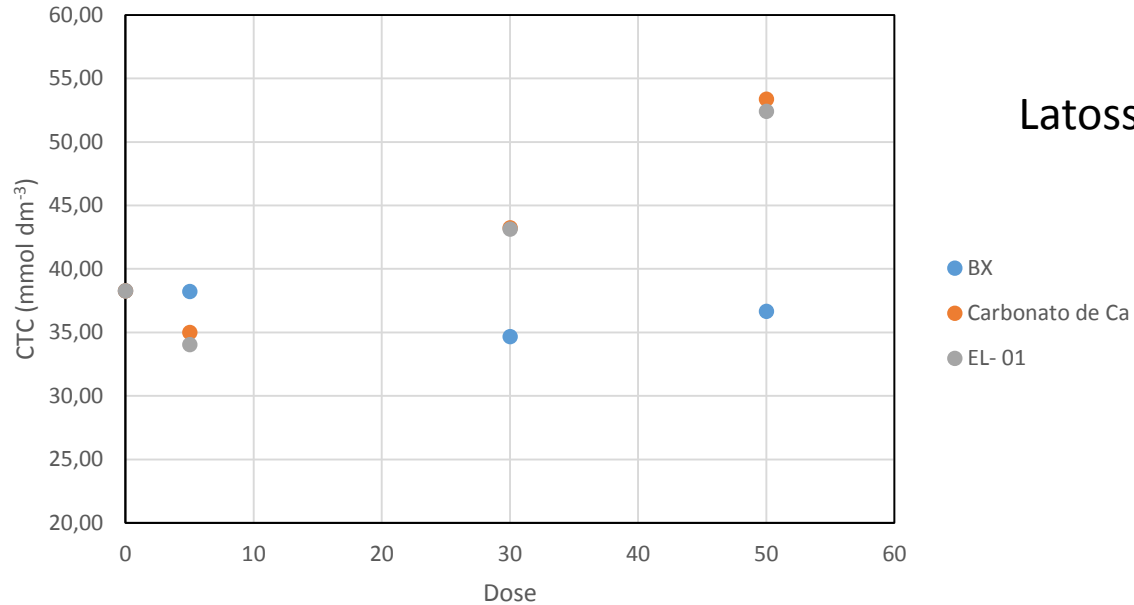
Embrapa Cerrados (2017)

Incubação de Kamafugito em solo



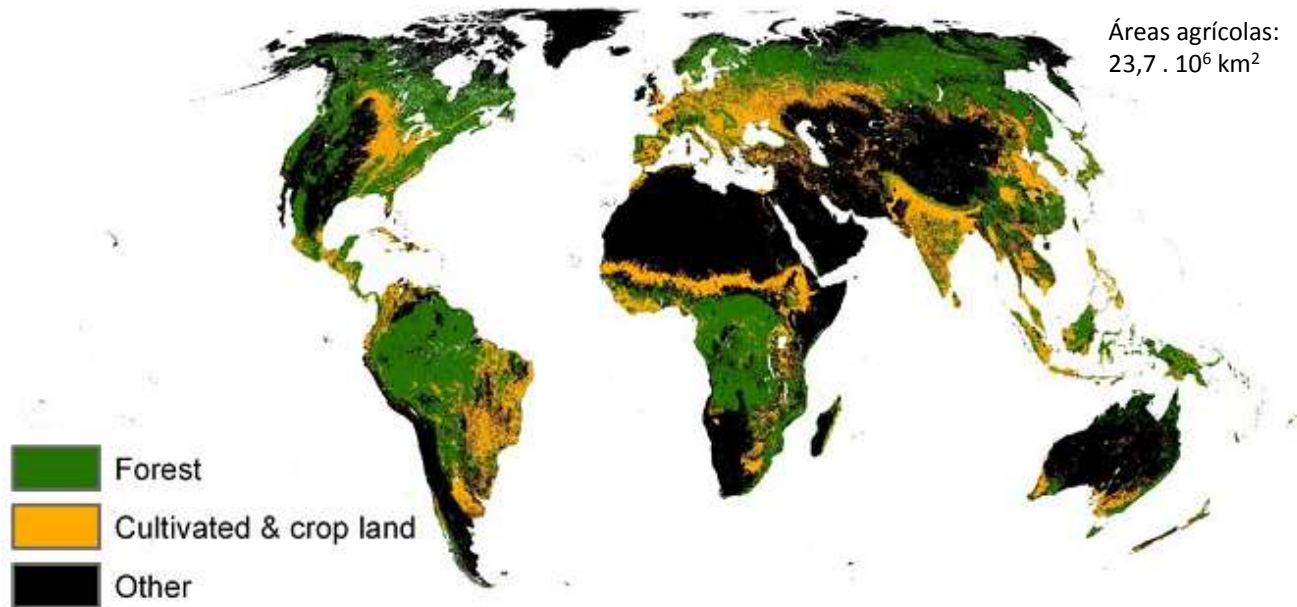
Embrapa Cerrados (2017)

Incubação de Kamafugito em solo



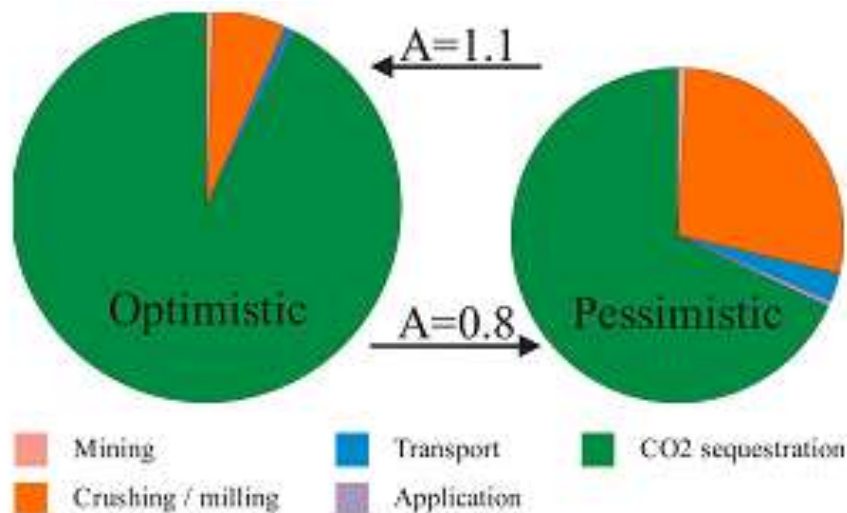
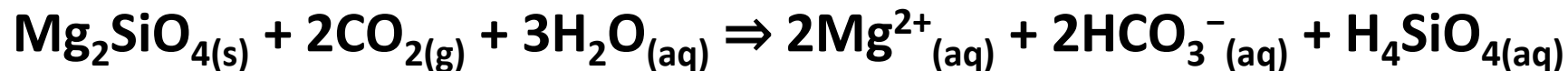
Embrapa Cerrados (2017)

Potencial de Agrominerais Silicáticos no Sequestro de C no solo



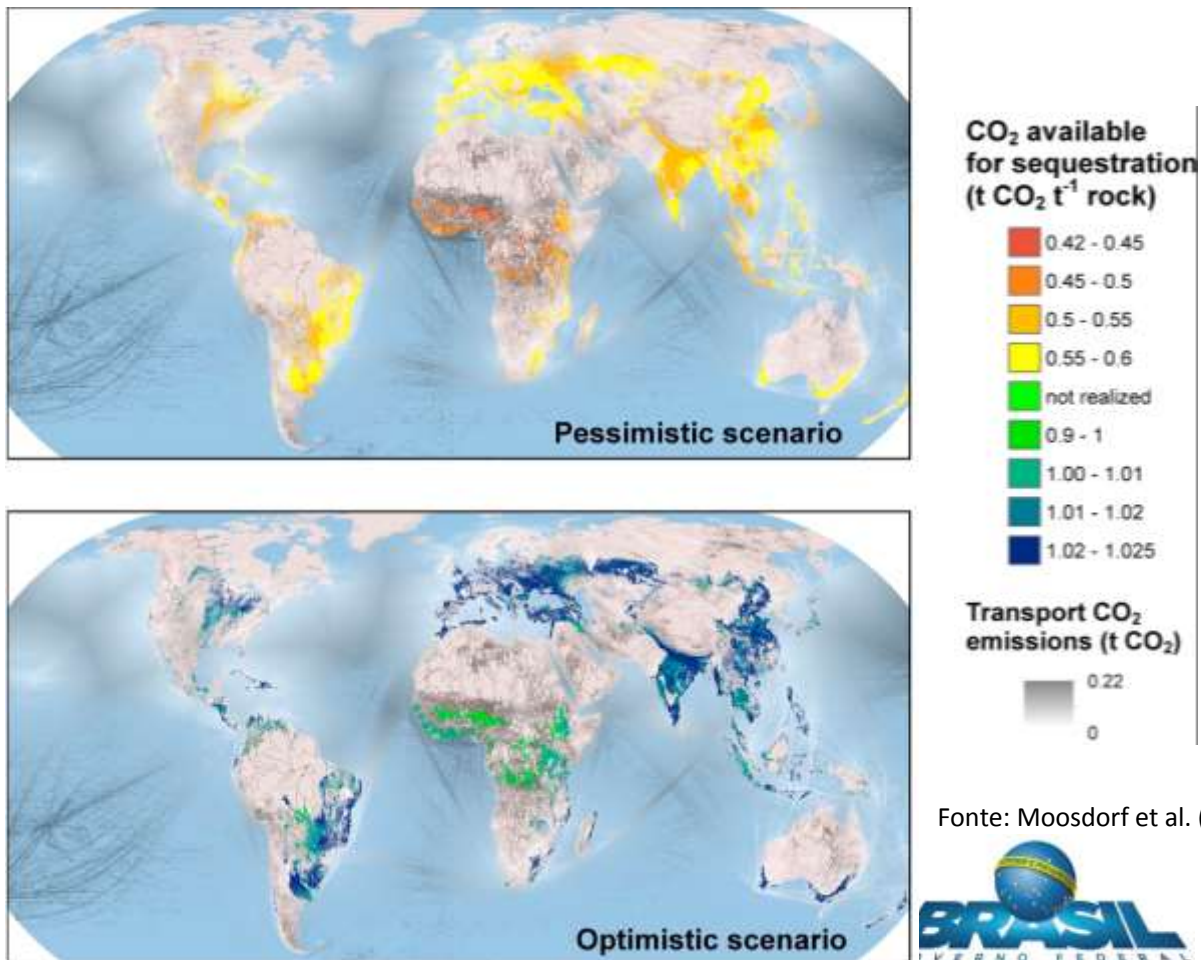
Fonte: Hartmann e Kempe (2008)

Potencial de Agrominerais Silicáticos no Sequestro de C no solo



Fonte: Moosdorf et al. (2014)

Potencial de Agrominerais Silicáticos no Sequestro de C no solo



Fonte: Moosdorf et al. (2014)





Programa Nacional de Zoneamento Agrogeológico



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



Variáveis Agrogeológicas

Agrominerais regionais

- Composição química
- Composição mineralógica
- Granulometria...

Sistema de cultivos

- Desenvolvimento de raízes
- Ciclagem
- Cobertura do solo...

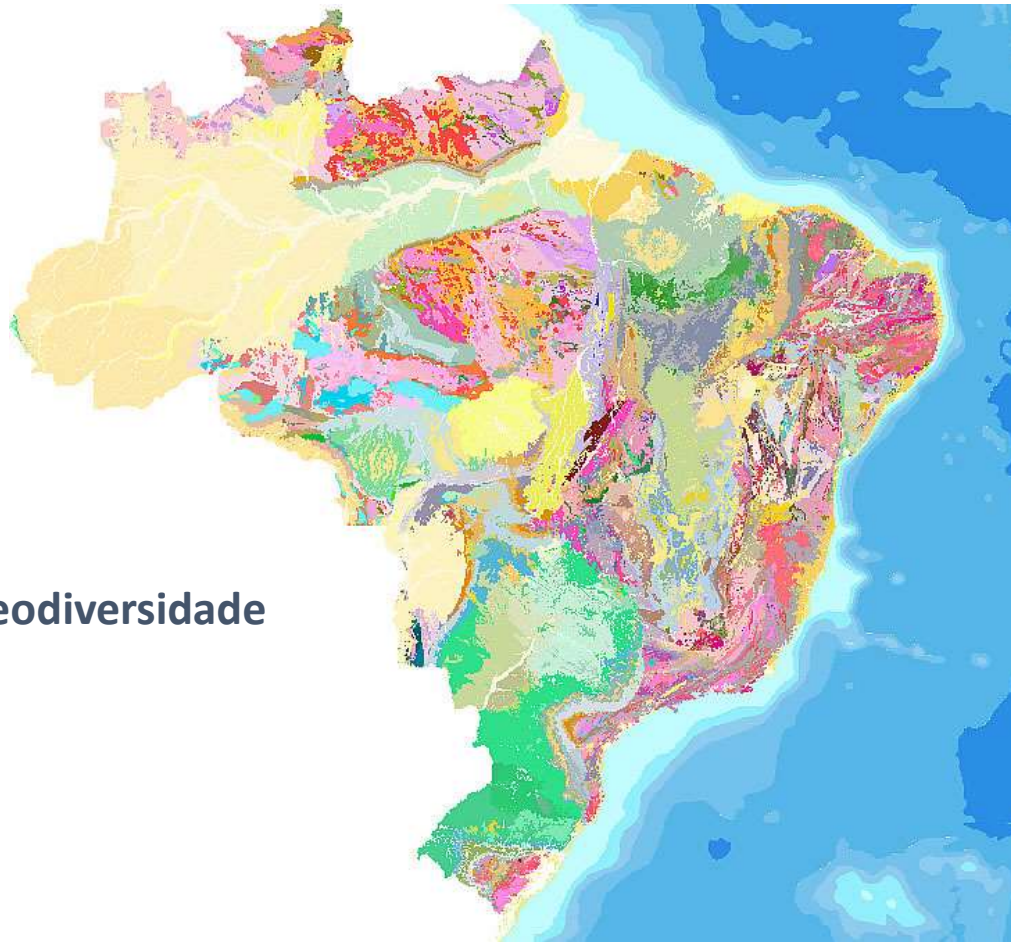
Solo

- Composição química
- Composição mineralógica
- Atividade biológica...

Clima

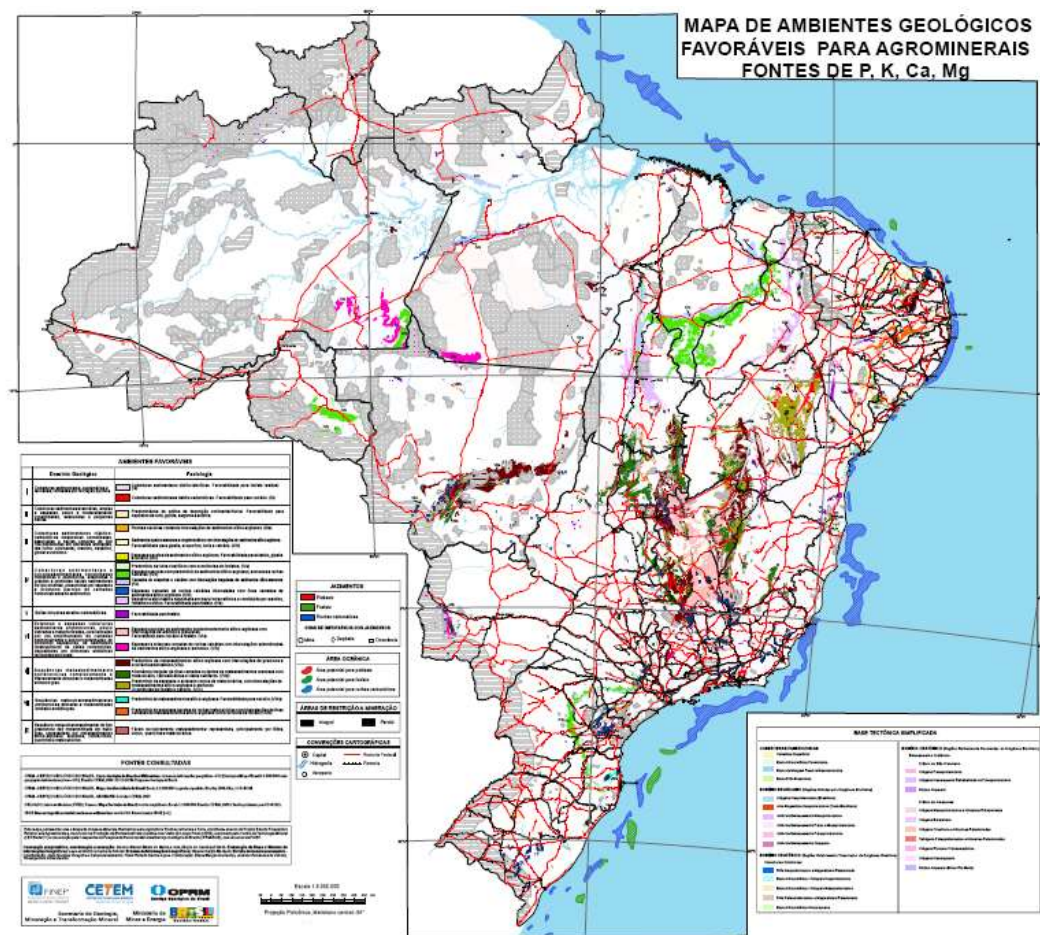
- Precipitação
- Temperatura
- Edafoclima...

Potencial

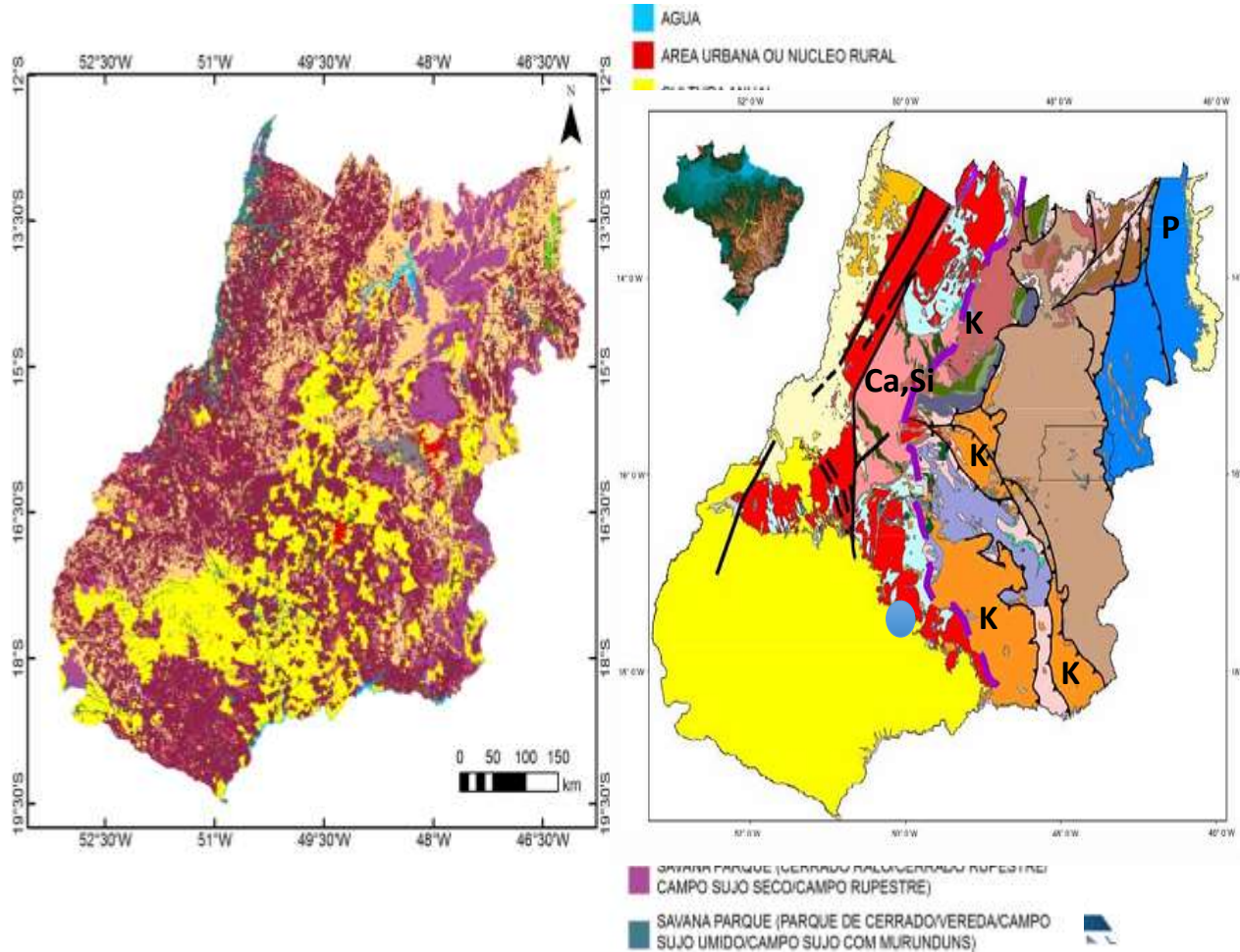


Megageodiversidade

Potencial



Zoneamento Agrogeológico



*Sistema Estadual de
mação - SIEG*

Processo Agrogeológico

- 1. Agrogeologia:** *Estudo dos solos agrícolas e das fontes de nutrientes, remineralizadores e condicionadores de solo regionais;*
- 2. Seleção de agrominerais:** *Função da disponibilidade, composição química, mineralógica, e eficiência agronômica;*
- 3. Produção de agrominerais:** *Definição da tecnologia de beneficiamento em função da eficiência agronômica;*
- 4. Manejo:** *Aplicação de agrominerais regionais com a finalidade de manejar a fertilidade do solo (nutrientes + cargas negativas).*



3. Produção de agrominerais



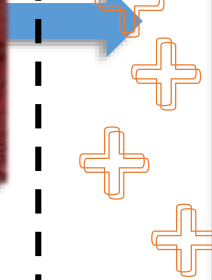
2. Seleção de agrominerais



1. Agrogeologia



4. Manejo



Produção de Solo



Produção de solo: *Formação de nova camada de solo a partir do intemperismo da rocha moída no solo original ao longo do tempo.*

- **Propriedades emergentes** – aumento da capacidade produtiva; intensificação ecológica; melhoria da eficiência de aproveitamento de nutrientes; mitigação do efeito estufa...

Remineralizadores de solos

Base Mineral – novos agrominerais como fontes de liberação controlada, geração de CTC permanente e aumento da eficiência de uso de nutrientes

Manejo – aumento da atividade biológica (sistema de produção e insumos biológicos) e potencial de sequestro de carbono no solo



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



GRATO



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO

