

O papel dos micro-organismos na transformação de minerais, caracterizada por métodos espectroscópicos: uma revisão

The role of microorganisms in mineral transformation, characterized by spectroscopic methods: a review

El papel de los microorganismos en la transformación de minerales, caracterizado por métodos espectroscópicos: una revisión

Recebido: 12/09/2022 | Revisado: 19/09/2022 | Aceitado: 21/09/2022 | Publicado: 28/09/2022

Luana Kesley Nascimento Casais

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7197-5524>
Universidade Federal do Tocantins, Brasil
E-mail: luana.casais@gmail.com

Emanoel dos Santos Vasconcelos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7045-3900>
Universidade Federal Rural do Semiárido, Brasil
E-mail: emanoeldsvpgm@gmail.com

Erika Valente de Medeiros

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5543-9414>
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Brasil
E-mail: erika.valente@ufape.edu.br

Gustavo Pereira Duda

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0998-4945>
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Brasil
E-mail: gustavo.duda@ufape.edu.br

Rhaiana Oliveira de Aviz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4462-4339>
Universidade Federal do Piauí, Brasil
E-mail: rhaianaoliveiradeaviz@gmail.com

Monique Moraes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2497-3806>
Universidade Federal Rural da Amazônia, Brasil
E-mail: moniquedemoraes5@gmail.com

Pablo Henrique de Almeida Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9128-6179>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: pabloalmeidaagro@gmail.com

Nágila Sabrina Guedes da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4006-1652>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: nagilasabrinaguedes@gmail.com

Silvana dos Santos Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0283-7552>
Universidade Federal Rural da Amazônia, Brasil
E-mail: silsilvaagro@gmail.com

Madson Jonhnston Souza Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3016-7106>
Universidade Federal Rural da Amazônia, Brasil
E-mail: jonhnstons.s@gmail.com

Resumo

A biomassa microbiana tem grande responsabilidade nas transformações biogeoquímicas no solo, sendo eles os maiores encarregadas pela mineralização, imobilização e disponibilização de nutrientes as plantas, algumas técnicas de espectrometria de massa estão sendo amplamente utilizadas, a fim de se conhecer como essas transformações acontecem na biomassa do solo, além de identificar a variação e distribuição dos microrganismos presentes no meio. Pela complexidade de organismos que podem estar presentes na microbiota, torna-se interessante a utilização de métodos rápidos e práticos. Nesse sentido, objetivou-se nesta revisão, compreender melhor o uso de novas técnicas que estão sendo empregadas e aprimoradas na amostra e resolução dessas atividades, assim como demonstrar sua eficácia tanto para amostragem da nutrição como o reconhecimento dos organismos presentes no solo, apontando

novas oportunidades de pesquisa. Entendendo que, por ser este um método bastante simples e que apresenta bons resultados, é sim possível a utilização e alguns métodos em pesquisas acadêmicas, podendo vir a ser uma ferramenta determinante na busca por resultados mais satisfatórios e com maior precisão.

Palavras-chave: Biomassa microbiana; Transformações biogeoquímicas; Espectrometria de massa; Mineralização.

Abstract

The microbial biomass has great responsibility in the biogeochemical transformations in the soil, being the most responsible for the mineralization, immobilization and availability of nutrients to the plants, some mass spectrometry techniques are being widely used, in order to know how these transformations happen in the biomass of the soil, in addition to identifying the variation and distribution of microorganisms present in the medium. Due to the complexity of organisms that may be present in the microbiota, it is interesting to use fast and practical methods. In this sense, the objective of this review was to better understand the use of new techniques that are being employed and improved in the sampling and resolution of these activities, as well as to demonstrate their effectiveness both for sampling nutrition and the recognition of organisms present in the soil, pointing out new research opportunities. Understanding that, because this is a very simple method that presents good results, it is possible to use some methods in academic research, and may become a decisive tool in the search for more satisfactory results and with greater precision.

Keywords: Microbial biomass; Biogeochemical transformations; Mass spectrometry; Mineralization.

Resumen

La biomasa microbiana tiene gran responsabilidad en las transformaciones biogeoquímicas en el suelo, siendo la mayor responsable de la mineralización, inmovilización y disponibilidad de nutrientes para las plantas, algunas técnicas de espectrometría de masas están siendo ampliamente utilizadas, con el fin de conocer cómo ocurren estas transformaciones en el suelo. biomasa del suelo, además de identificar la variación y distribución de microorganismos presentes en el medio. Debido a la complejidad de organismos que pueden estar presentes en la microbiota, es interesante utilizar métodos rápidos y prácticos. En este sentido, el objetivo de esta revisión fue conocer mejor el uso de las nuevas técnicas que se están empleando y mejorando en el muestreo y resolución de estas actividades, así como demostrar su eficacia tanto para el muestreo nutricional como para el reconocimiento de organismos presentes. en el suelo, señalando nuevas oportunidades de investigación. Entendiendo que, por tratarse de un método muy simple que presenta buenos resultados, es posible utilizar algunos métodos en la investigación académica, pudiendo convertirse en una herramienta decisiva en la búsqueda de resultados más satisfactorios y con mayor precisión.

Palabras clave: Biomasa microbiana; Transformaciones biogeoquímicas; Espectrometría de masas; Mineralización.

1. Introdução

A produção vegetal, assim como a biomassa acima e abaixo do solo, está positivamente ligada com a abundância e a diversidade microbiana. Se presume que esta atividade microbiana desempenha um papel significativo na disponibilidade e transferência de nutrientes do solo para as plantas, e contribuindo na fertilidade do solo (Duchene, Vian & Celette, 2017). A comunidade microbiana do solo tem grande importância, por serem o principal agente na ciclagem de nutrientes, atuando no estabelecimento de plantas, transformações geoquímicas e formação do solo (Thavamani et al., 2017).

A biomassa microbiana é responsável pelas transformações biogeoquímicas no solo, sendo eles os maiores encarregados pela mineralização, imobilização e disponibilização de nutrientes as plantas. A manutenção de níveis elevados de carbono da biomassa microbiana acaba por condicionar um incremento na ciclagem dos nutrientes, que por sua vez são imobilizados na fitomassa e após a decomposição podem ser liberados ao solo, além do mais, a própria biomassa microbiana se constitui em uma reserva lábil de nutrientes, sendo com grande rapidez liberados para o solo, por conta do baixo tempo de vida desses microrganismos (Carneiro et al., 2008).

Tais elementos são essências ao desenvolvimento das plantas, onde entram na biosfera principalmente pelo sistema radicular, posteriormente translocados aos diferentes órgãos da planta, no qual desempenharão variadas funções biológicas (Taiz et al., 2017). Algumas técnicas de espectrometria de massa estão sendo amplamente utilizadas, a fim de se conhecer

como essas transformações acontecem na biomassa do solo, além de identificar a variação e distribuição dos microrganismos presentes no meio.

A espectrometria de XRF é uma técnica de análise multielementar que é rápida, relativamente segura (com uso apropriado) e potencialmente mais precisa do que alguns métodos convencionais utilizados (Reidinger, Ramsey & Hartley, 2012). Algumas dessas técnicas de raio-X podem medir diretamente a especiação química de algumas substâncias e, ao mesmo tempo, identificar a estrutura ou forma mineral das placas de alguns nutrientes para ajudar a entender melhor os processos e ciclos geoquímicos, potencialmente mediados por atividades microbianas, ocorrendo em locais discretos na rizosfera (Honeker et al., 2016).

Pensando em entender melhor como ocorrem tais transformações ocorridas no solo através da biomassa microbiana, e em decorrência da escassez de trabalhos que ressaltem tal importância dos microrganismos, a sua atividade nos ciclos biogeoquímicos e os métodos empregados nessas análises, esta revisão tem por objetivo compreender melhor o uso de novas técnicas que estão sendo empregadas e aprimoradas na amostra e resolução dessas atividades, assim como demonstrar sua eficácia tanto para amostragem da nutrição como o reconhecimento dos organismos presentes no solo, apontando novas oportunidades de pesquisa.

2. Metodologia

Para esta revisão narrativa, de caráter qualitativo, foi utilizada em sua maioria, artigos publicados em revistas científicas nacionais e internacionais, no entanto, abrangeu também dissertações de mestrado, livros, comunicados técnicos e alguns sites relacionados à área de interesse. Para isto, foi realizada buscas nas bases de dados: Scopus, Google Acadêmico, Periódicos CAPES e SciELO. Para facilitar a busca pelas publicações científicas foram utilizadas palavras-chave como: “Biomassa microbiana”, “transformações biogeoquímicas”, “espectrometria de massa” e “mineralização”, em português, inglês e espanhol.

3. Revisão da Literatura

Conforme Rother (2007), os estudos de revisão narrativa são baseados em publicações amplas próprias para descrever e discutir a evolução ou o ‘estado da arte’ de um assunto específico, sob ponto de vista teórico ou conceitual. Portanto, a metodologia utilizada é advinda de textos que constituem a análise da literatura científica na interpretação e análise crítica dos autores, especificamente Croxatto, Prod'hom & Greub (2012), que traz uma abordagem da relação do uso da técnica com microrganismos. A maioria do material bibliográfico selecionado para o estudo (66%), foram publicados com um tempo de até 10 anos pois, o método XFR já vem sendo estudado a algum tempo, no entanto, este método começou a ter mais visibilidade principalmente na área agrônômica.

Quadro 1: Descrição dos artigos selecionados para o estudo, segundo autor (es), título do artigo e revista no qual foi publicado.

Autor/ano	Título do artigo	Revista
(Thavamani et al., 2017).	Microbes from mined sites: Harnessing their potential for reclamation of derelict mine sites	Environmental Pollut
(Carneiro et al., 2008).	Carbono orgânico, nitrogênio total, biomassa e atividade microbiana do solo em duas cronosequências de reabilitação após mineração de bauxita	Revista Brasileira de Ciência do Solo
(Reidinger, Ramsey & Hartley, 2012).	Análises rápidas e precisas de silício e fósforo em plantas usando um espectrômetro portátil de fluorescência de raios-X	Novo Phytol
(Madsen, 2011).	Microorganisms and their roles in fundamental biogeochemical cycles	Current Opinion in Biotechnology
(Meneghini, 2016).	Análise metagenômica e potencial biotecnológico de microrganismos de solo e água de uma área agrícola com adubação orgânica	(Tese de doutorado). Universidade Estadual Paulista
(Smil, 2000).	Phosphorus in The Environment: natural flows and human interferences	Annual Review Of Energy And The Environment
(Pavan & Monteiro, 2014).	Técnicas moleculares aplicadas à sistemática e ao controle vetorial	GALVAO C, Organizador. Vetores da Doença de Chagas no Brasil. Sociedade Brasileira de Zoologia, Série Zoologia: Guias e Manuais de Identificação
(Souza, 2008).	Aplicações da espectrometria de massas e da cromatografia líquida na caracterização estrutural de biomoléculas de baixa massa molecular	(Tese de doutorado), Universidade Federal do Paraná
(Lider, 2017).	X-ray microscopy	Physics-uspek
(Chen et al., 2014).	Soft X-ray Spectromicroscopy Study of Mineral-Organic Matter Associations in Pasture Soil Clay Fraction	Environmental Science & Technology

Fonte: Autores.

3.1 Papel dos micro-organismos na transformação de minerais nos ciclos biogeoquímicos

A biogeoquímica é a área que se empenha em entender processos complexos, que em sua maioria são realizados por micro-organismos, agentes que transformam e reciclam substâncias orgânicas quanto inorgânicas em solos, em sedimentos e águas (Madsen, 2011). Os ciclos biogeoquímicos interligam a atmosfera à biota e aos solos.

De forma simplificada, através da fotossíntese, o carbono é transferido da atmosfera para o sistema terrestre, que retorna através do processo de respiração. Assim como o nitrogênio é transferido da atmosfera para o sistema terrestre através da fixação biológica de nitrogênio, com retorno à atmosfera através dos processos de desnitrificação e subsequente volatilização (Bustamante, Ometto & Martinelli, 2017). Bem como o fosfato é liberado gradualmente das apatitas e absorvido pelas plantas e pela biomassa microbiana, em seguida é incorporado na matéria do solo e sedimentos, e novamente depositado em formas minerais pouco solúveis (Rincón & Gutiérrez, 2012). O enxofre apresenta grande similaridade nos processos de transformações com o nitrogênio, uma vez que se apresentam características físico-químicas semelhantes que reagem nas suas transformações, apresentando um número grande de estados de oxidação, sendo sua ocorrência de forma natural e orgânica nos solos agrícolas, além de grande atuação de microrganismos nessas transformações (Gonzaga, 2019).

Os micro-organismos desempenham um importante papel no ciclo biogeoquímico, atuando na decomposição de vegetais e animais, formando húmus que são acumulados principalmente nos horizontes mais superficiais, estando as coberturas vegetais atuantes de forma direta e indireta no solo e na nutrição das plantas (Silva & Oliveira, 2020). No ambiente, eles estão diretamente relacionados com o equilíbrio e, portanto, a alteração da diversidade microbiana de determinado solo

pode afetar alguns processos, como os ciclos do carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre, evidenciando a fundamental importância que eles apresentam para diversas atividades em todos os tipos de ecossistemas (Meneghine, 2016).

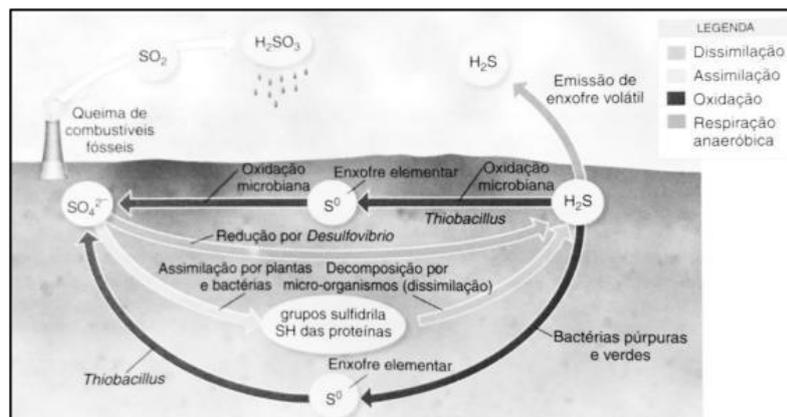
O carbono é o elemento central de todas as moléculas orgânicas, sendo, portanto, um dos elementos mais abundantes na natureza. De maneira geral, o ciclo do carbono ocorre por meio de todos os principais reservatórios de carbono da Terra, desde a atmosfera em si até a biomassa. A contribuição mais importante do CO₂ para a atmosfera é a decomposição microbiana da matéria orgânica morta (Meneghine, 2016). O ciclo do carbono é caracterizado por ter um mecanismo que estimula a biosfera a partir da fixação do CO₂ atmosférico (fotossíntese) e sua transformação em biomassa, mais tarde, essa biomassa retorna ao solo como uma necromassa mineralizada pelos diversos organismos que o transformam pela respiração em CO₂. Finalmente, o CO₂ é devolvido à atmosfera ou tomado como entrada em organismos autotróficos, de modo a iniciar um novo ciclo (Vásquez, 2018).

Apesar de ser abundante na atmosfera, para o crescimento das plantas o nitrogênio é um dos nutrientes mais limitantes, e faz parte da estrutura de clorofilas, aminoácidos e ácidos nucleicos, em função disso, a deficiência inibe o crescimento vegetal (Taiz et al., 2017). Aproximadamente 95% do N presente no solo se encontram na forma orgânica e para a sua mineralização ocorre um processo enzimático que é resultante da conversão de formas orgânicas para formas inorgânicas disponíveis para as plantas. Sendo esse processo conduzido por microrganismos heterotróficos, anaeróbios e aeróbios, que utilizam os resíduos vegetais como fontes de energia, carbono (C) e N (Vieira, 2017).

O fosfato historicamente tem sido visto como uma forma inesgotável e abundante de fósforo, o que veio estimulando a sua ampla utilização, principalmente na agricultura (Smil, 2000). No entanto, este elemento é obtido a partir da sua extração de rochas fosfáticas, conhecidas também como fosforite, que são constituídas em uma fonte não renovável. Não existem na natureza compostos de fósforo presentes na fase gasosa, fato este que dificulta a ciclagem deste elemento comparando-se com os ciclos biogeoquímicos de outros elementos como o carbono, nitrogênio e enxofre (Pantano et al., 2016). O ciclo natural do fósforo é baseado na decomposição de plantas e animais que ocasionam a liberação do P para o solo, e assim, a ciclagem de P é fortemente acoplada através da imobilização e mineralização microbiana (Mooshammer et al., 2014).

O enxofre se encontra em grande maioria retido em sedimentos e na crosta terrestre, entretanto está em pequenas quantidades na atmosfera, ele pode ser encontrado em diversos estados de oxidação nos compostos orgânicos e inorgânicos, não sendo possível de ser utilizado na sua forma elementar, por organismos superiores, o enxofre necessita ser catalisado. Para que esse processo aconteça microrganismos catalisam a sua oxidação e / ou redução, e estabelecem um ciclo (Figura 1). Este ciclo biogeoquímico é impulsionado por processos microbianos (Santos et al., 2015). O ciclo do enxofre possui grande complexidade. Sendo este elemento encontrado em diferentes estados redox e as suas reações podem ser impulsionada por diversas enzimas. Sendo assim, o ciclo envolve vias metabólicas sequenciais que são mediadas por diversos agentes biológicos (Stulen & De kok, 2012; Dahl et al., 2008).

Figura 1 - Esquema dos processos bioquímicos envolvidos no ciclo do enxofre.



Fonte: Tortora, Funke e Case (2012).

O ciclo do enxofre deve ser observado completamente, de forma a entender de onde este elemento está sendo emitido, neste caso, pela queima de combustíveis fósseis, até as transformações que acontecem no solo, onde microrganismos exercem sua função extremamente crucial na oxidação do enxofre, transformando o mesmo para formas que são absorvidas pelas plantas.

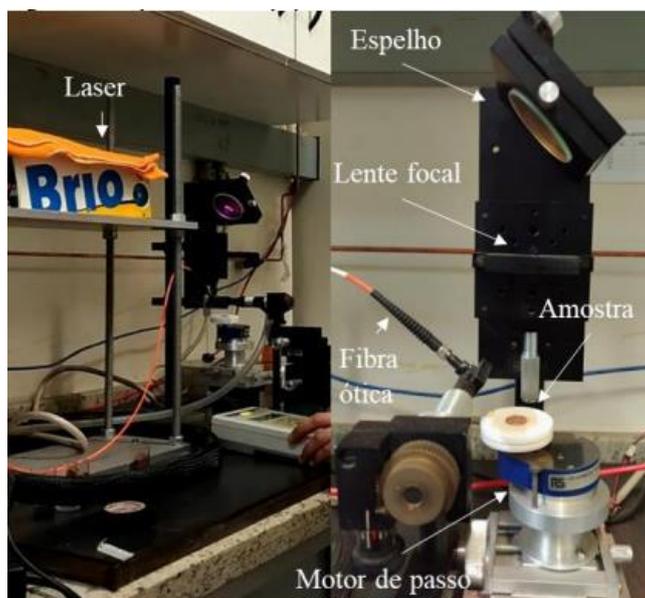
3.2 Métodos geralmente utilizados para caracterizar tais transformações

Pela complexidade de organismos que podem estar presentes na microbiota, torna-se interessante a utilização de métodos rápidos e práticos. Pensando nisso alguns métodos são bastante utilizados, a fim de facilitar a identificação desses organismos. Dentre os métodos, pode-se citar avaliação morfológica, capacidade metabólica, pH e tempo de crescimento (caracterização fenotípica) através do cultivo dos microrganismos em placas de petri, contendo meio de cultura específico (Leal et al., 2021). Entretanto, com esses métodos não é possível identificar em níveis taxonômicos, dessa forma, é necessário o uso de técnicas mais complexas, como sequenciamento do gene 16s rRNA (Pavan & Monteiro, 2014).

Um espectrômetro de massa atual é constituído de três módulos, sendo eles: a fonte ionizante, o analisador de massas e o detector, ou armadilha de íons (Souza, 2008). Bem, para o seu funcionamento são realizados os seguintes passos: vaporização de uma amostra no espectrômetro de massa, a ionização da amostra e formação de partículas carregadas positivamente, aceleração dessas partículas em campo magnético, computação da relação massa-carga e a detecção de íons (Croxatto, Prod'hom & Greub, 2012). Trata-se de uma tecnologia que vem ganhando grande espaço na comunidade acadêmica pelos seus benefícios. Algumas técnicas que utilizam essa tecnologia estão sendo amplamente utilizadas, são elas: Espectrometria de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS) e fluorescência de raios-X dispersiva em energia (EDXRF).

LIBS é uma técnica espectroanalítica, que ao focalizar a amostra, funciona empregando um laser pulsado de alta irradiância (Figura 2), promovendo uma microamostragem por ablação e uma subsequente excitação das espécies presentes no microplasma durante e/ou imediatamente após a ablação. Átomos, íons e fragmentos de moléculas, que foram excitados no microplasma, emitem a radiação em comprimentos de onda que são característicos, possibilitando a descrição qualitativa dos componentes da amostra (Santos Júnior, 2006).

Figura 2 – Componentes do equipamento LIBS.



Fonte: Coutinho (2018).

A técnica oferece algumas vantagens como a possibilidade de trabalhar com amostras sólidas, líquidas ou gasosas, e não requer preparo das amostras dispendiosas, fornecendo uma resposta em tempo real, e com isso, gerando uma boa quantidade de informações sobre a amostra analisada em uma única análise sendo bem sensível (Kearton & Mattley, 2008). Porém, também é observado algumas desvantagens na técnica, principalmente com relação ao tamanho do equipamento, que é muito grande, e apresenta uma complexidade das configurações para se obter análises mais precisas (Anabitarte, Cobo & Lopez-Higuera, 2012).

A técnica de análise pelo EDXRF, refere-se a uma técnica analítica nuclear, instrumental, multielementar e simultânea, sendo baseada na medição das intensidades de raios X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra, a partir de excitação por meio de um feixe de raios X (Ishida, 2018). Nessa técnica, é utilizado a energia dispersiva, que concerne à técnica de detecção dos raios X emitidos, que é efetuada por um detector de silício (Si), que gera um espectro de intensidade em função da energia, a intensidade da energia característica emitida pelos componentes da amostra está relacionada à concentração de cada elemento presente na amostra (Alexandre & Bueno, 2006).

3.3 Espectromicroscopia de raios-x

A microscopia de raios-X é a coleção de métodos para investigar a estrutura microscópica de objetos com o auxílio da radiação de raios-X. São empregados elementos ópticos de foco que permitem obter imagens ampliadas de um objeto sob investigação no espaço real. Devido ao seu curto comprimento de onda, os raios X penetram uma amostra a uma profundidade muito maior que a luz visível. Por consequente, eles podem ser usados para estudar a estrutura interna de objetos opacos à luz visível. A microscopia de raios X pode atingir a resolução limitada por difração na ordem de várias dezenas de nanômetros e ocupa uma posição intermediária entre a microscopia óptica e eletrônica (Lider, 2017).

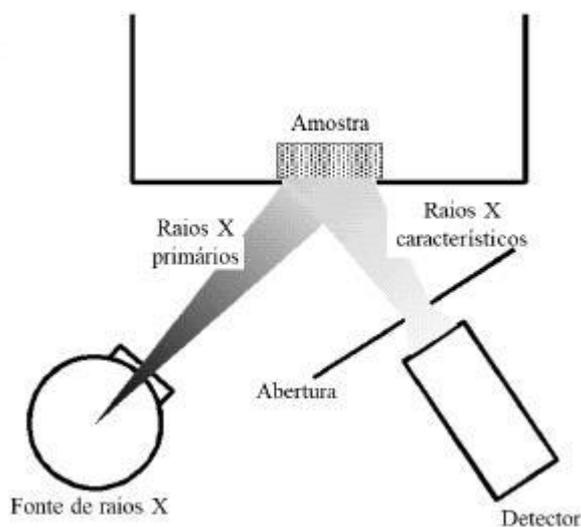
A conhecida técnica de espectrometria de raios-X (XRF) (Willis & Duncan, 2008) permite a análise simultânea rápida e precisa de muitos elementos. É comumente usada para diferentes aplicações com o fim de estudar a composição elementar das amostras (Banaś et al., 2013). A técnica também é muitas vezes utilizada em estudos de amostra multielementar da composição em uma ampla gama de concentrações, amostras com matrizes diferentes e também matrizes não homogêneas.

(Fittschen & Falkenberg, 2011). No procedimento típico de preparação de amostras de XRF, o material a ser analisado é triturado, moído (com tempo de moagem diferente) e formado como pellet (o uso de pressão diferente). Também pode haver o uso de diferentes ligantes de cera, que são usados no processo de formação de grânulos. O procedimento apropriado de preparação de amostras pode reduzir efeitos perturbadores (Kubala-Kukus et al., 2015).

Em XRF, a amostra é irradiada com um feixe de raios X (primários), que apresentam energia suficiente para promover a ejeção de um elétron de uma camada interna do átomo, criando uma vacância. Este vazio é preenchido por um elétron de maior energia e, no processo, há liberação de energia, ou geração de radiação secundária (fluorescência), desprendida na forma de um fóton de raios X (Adame, 2018).

Três partes principais constituem um espectrômetro de fluorescência de raios X (Figura 3): uma fonte de excitação, elementos ópticos que focalizam o feixe e um sistema de detecção (Short et al., 1981). O sistema de detecção XRF pode ser dividida em dois grupos: modo dispersivo em comprimento de onda (WDXRF, do inglês *Wavelength Dispersive X ray Fluorescence*) e modo dispersivo em energia (EDXRF, do inglês *Energy Dispersive X ray Fluorescence*) (ADAME, 2018).

Figura 3- Representação das partes que compõem o espectrômetro de fluorescência de raios X.



Fonte: Adame (2018).

Na espectrometria de fluorescência de raios-X dispersiva em energia (EDXRF) é apresentado um espectrômetro com funções bem semelhantes a um sistema de contador proporcional, exceto por apresentar melhor resolução de energia. No início da década de 1970 os espectrômetros por energia dispersiva se tornaram uma técnica disponíveis, onde um detector semicondutor de Si (Li) foi usado para permitir a distribuição das amplitudes dos pulsos de tensão proporcionais à distribuição de energia dos fótons (Jenkins, 2000).

EDXRF emprega detectores que são capazes de discriminar a energia dos raios X ao atingirem o detector. O espectro todo pode ser adquirido em uma só vez, tornando EDXRF ideal em análises exploratórias (*screening*) e também análise de amostras que sofrem danos pela incidência de radiação (Carvalho et al., 2018).

3.4 Os benefícios da espectromicroscopia de raios x para o entendimento das transformações ocorridas no solo

Existe uma aceitação crescente de que associações com minerais do solo podem ser o mecanismo de estabilização abrangente mais importante para a matéria orgânica do solo. No entanto, a investigação direta de associações organo-minerais

tem sido dificultada pela falta de métodos que possam caracterizar simultaneamente a matéria orgânica (OM) e os minerais do solo (Chen et al., 2014). O conhecimento de cada peça individual do quebra-cabeça contribui para uma melhor compreensão da imagem geral. Nosso conhecimento da captação e metabolismo de contaminantes ambientais por organismos biológicos se encontra longe de estar completo. Transporte elementar, processos redox, atividade microbiana, áreas como geoquímica, hidrologia, microbiologia, ciência atmosférica e ciência do solo são campos científicos essenciais de estudo. Por exemplo, os papéis complexos de carbono, nitrogênio, os ciclos de fósforo e enxofre no meio ambiente ainda são incompletos, assim como suas interações mútuas (Thieme et al., 2010).

Por conta de tais fatores a microscopia de raios-X (STXM) foi desenvolvida, apresentando o potencial de fornecer resolução em nanoescala das associações entre materiais biológicos e geológicos. Onde as amostras devem ser preparadas, medidas e analisadas para permitir que os resultados dessa ferramenta de imagem espectroscópica em nanoescala sejam dimensionados para resultados biogeoquímicos de forma correta. É utilizada uma técnica simples de preparação de amostras que permite avaliar informações detalhadas espectroscópicas de minerais, metais e micróbios na nano e micro-escala em colóides do solo (Dynes et al., 2015).

A espectromicroscopia de raios X é uma ferramenta muito útil para as ciências ambientais devido à sua alta resolução espectral e espacial. Nas áreas de ciência dos materiais, biologia e ciências médicas, ele já foi usado com sucesso. Agora está começando a ser usado em estudos ambientais, por exemplo, na forma de espectromicroscopia com resolução espacial abaixo de 50 nm na faixa de energia de raios-X sub-keV e na forma de estudos de fluorescência de raios-X na faixa de energia de keV com resolução espacial abaixo de 100nm (Aoki, Kagoshima & Suzuki, 2006; Susini, Joyeux & Polack, 2003).

No total, a espectromicroscopia de raios-X possui a capacidade exclusiva de análise química quantitativa em bases moleculares e não apenas elementares, com uma quantização baseada em absorção de raios-X de alta resolução ou espectroscopia de fotoelétrons. Pode ser aplicado a materiais complexos, incluindo interfaces enterradas, fases pouco cristalinas ou mesmo amorfas, amostras úmidas (por exemplo, biológicas e ambientais) e materiais sensíveis ao vácuo e à radiação. Ao combinar informações químicas espectroscópicas com alta resolução espacial, a espectromicroscopia de raios X oferece muitas novas.

4. Considerações Finais

Por ser este um método bastante simples e que apresenta bons resultados, tanto na área da microbiologia agrícola, como em demais áreas de pesquisa, é sim possível a utilização dos métodos de espectrometria de Raios-X em pesquisas acadêmicas, podendo vir a ser uma ferramenta determinante na busca por resultados de pesquisas mais satisfatórios e com maior precisão. Entretanto é inegável que o avanço nesta tecnologia só tem a contribuir na determinação de aspectos ainda pouco discutidos, como as interações dos microrganismos nas transformações minerais.

Diante do exposto, sugerem-se novos estudos que testem a dinâmica de transformação de outros elementos essenciais as plantas como as do nitrogênio principalmente em condições de baixa disponibilidade de oxigênio no solo, outra vertente que se pode seguir, seria a investigação da forma que microrganismos se comportam em condições de salinidade, visto que, estudos como este poderia ajudar a desenvolver tecnologias e estratégias para ter um melhor desenvolvimento agrícola em regiões semiáridas, onde, o excesso de sais no solo é uma realidade e limita a produção agrícola.

Referências

Adame, A (2018). *Análise direta de folhas de soja por espectrometria de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS) e por fluorescência de raios X dispersiva em energia (EDXRF)* (Tese de doutorado). Universidade de São Paulo, Piracicaba, Brasil.

- Alexandre, T. L., Bueno, M. I. M. S., Alexandre, T. L., Bueno, M. I. M. (2006). Classification of some species, genera and families of plants by x-ray spectrometry. *X-Ray Spectrometry: An International Journal*, 35(4), 257-260.
- Anabitarde, F., Cobo, A., & Lopez-Higuera, J. M. (2012). Laser-induced breakdown spectroscopy: fundamentals, applications, and challenges. *International Scholarly Research Notices*, 2012, 1–12.
- Aoki, S., Kagoshima, Y., & Suzuki, Y. (2006). The Physics of Interaction in Disordered Systems. *Anais da 8ª Conferência Internacional sobre Microscopia de Raios-X*. Tóquio: Instituto de Física Pura e Aplicada, Série de Conferências 7.
- Banaś, D., Braziewicz, J., Kubala-Kukuś, A., Majewska, U., Pajek, M., Wudarczyk, J., Czech, K., Garnuszek, M., Słomkiewicz, P., & Szczepanik, B. (2013). Estudo das propriedades de absorção de amostras de halloysite modificadas quimicamente com métodos de fluorescência de raios X e difração de raios X em pó. *Radiat. Phys. Chem*, 93, 129 – 134.
- Bustamante, M., Ometto, J., & Martinelli, L. A. (2017). Biodiversidade e ciclos biogeoquímicos. In: Nobre, C. A., & Marengo, J. A. *Mudanças Climáticas em Rede Um olhar interdisciplinar: contribuições do instituto nacional de ciência e tecnologia para mudanças climáticas*. Bauru, Brasil: Canal 6 Editora.
- Carneiro, M. A. C., Siqueira, J. O., Moreira, F. M. S., & Soares, A. L. L. (2008). Carbono orgânico, nitrogênio total, biomassa e atividade microbiana do solo em duas cronosséquences de reabilitação após mineração de bauxita. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32(2), 621-632.
- Carvalho, G. G. A., Guerra, M. B. B., Adame, A., Nomura, C. S., Oliveira, P. V., Carvalho, H. W. P., Santos jr, D., Nunes, L. C., & Krug, F. J. (2018). Recent advances in LIBS and XRF for the analysis of plants. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 33(6), 919-944.
- Chen, C., Dynes, J. J., Wang, J., Karunakaran, C., & Sparks, D. L. (2014). Soft X-ray Spectromicroscopy Study of Mineral-Organic Matter Associations in Pasture Soil Clay Fractions. *Environmental Science & Technology*, 48(12), 6678-6686.
- Coutinho, M. A. N. (2018). *Determinação de teores de NPK no solo por espectroscopia com diferentes formas de preparo da amostra* (Dissertação de mestrado). Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.
- Croxatto, A., Prod'hom, G., & Greub, G. (2012). Applications of MALDI-TOF mass spectrometry in clinical diagnostic microbiology. *FEMS Microbiology Reviews*, 36(2), 380- 407.
- Dahl, C. Hell, R. Leustek, T & Knaff, D. (2008). Introduction to Sulfur Metabolism in Phototrophic Organisms. In: Rudiger Hell, Dahl Christiane. Knaff David & Leustek Thomas. *Sulfur Metabolism in Phototrophic Organisms*. Springer, 27.
- Dynes, J. J., Regier, T. Z., Snape, I., Siciliano, S. D., & Peak, D. (2015). Validating the Scalability of Soft X-ray Spectromicroscopy for Quantitative Soil Ecology and Biogeochemistry Research. *Environmental Science & Technology*, 49(2), 1035-1042.
- Duchene, O., Vian, J., & Celette, F. (2017). Consorciação com leguminosas para sistemas de cultivo agroecológico: Processos de complementaridade e facilitação e a importância dos microrganismos do solo. Uma revisão. *Agricultura, Ecossistemas e Meio Ambiente*, 240, 148-161.
- Fittschen, U., & Falkenberg, G. (2011). Tendências na ciência ambiental usando fluorescência microscópica de raios-X. *Spectrochim. Acta B*, 66, 567-580.
- Gonzaga, M. M. (2019). *Oxidação no solo de enxofre elementar micronizado aplicado no recobrimento de MAP* (Trabalho de conclusão de curso). Universidade De São Paulo, Piracicaba, Brasil.
- Honeker, L. K., Root, R. A., Chorover, J., & Maier, R. M. (2016). Resolving colocalization of bacteria and metal(loid)s on plant root surfaces by combining fluorescence in situ hybridization (FISH) with multiple-energy micro-focused X-ray fluorescence (ME μ XRF). *Journal of Microbiological Methods*, 131, 23-33.
- Ishida, L. Y. (2018). *Caracterização química e análise quantitativa dos oligoelementos nos dentes humanos por espectrometria de fluorescência de raios X por energia dispersiva para inferência forense* (Dissertação de mestrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- Jenkins, R. (2008). X-Ray Fluorescence Spectrometry. *Handbook of Analytical Techniques*.
- Kearton, B., & Mattley, Y. (2008). Laser-induced breakdown spectroscopy: Sparking new applications. *Nature Photonics*, 2(9), 537–540.
- kubala-kukus, A., Banaś, D., Braziewicz, J., Dziadowicz, M., Kopeć, E., Majewska, U., Mazurek, M., Pajek, M., Sobisz, M., Stabrawa, I., Wudarczyk-moćko, J., & Gózdź, S. (2015). Técnicas de espectrometria de raios X e microtomografia de raios X para análise de amostras geológicas e de solo. *Science Direct*, 364, 85-92.
- Leal, M. L. A., Chaves, J. S., Silva, J. A., Silva, L. S., Soares, R. B., Nascimento, J. P. S., Matos, S. M., Teixeira Júnior, D. L., & Brito Neto, A. F. 2021. Effect of management systems and land use on the population of soil microorganisms. *Research, Society and Development*, 10(9), 1-11.
- Lider, V V. (2017). X-ray microscopy. *Physics-uspekhi*, 60(2), 187-203.
- Madsen, E. L. (2011). Microorganisms and their roles in fundamental biogeochemical cycles. *Current Opinion in Biotechnology*, 22(3), 456–464.
- Meneghini, A. K. (2016). *Análise metagenômica e potencial biotecnológico de microrganismos de solo e água de uma área agrícola com adubação orgânica* (Tese de doutorado). Universidade Estadual Paulista - Unesp, Jaboticabal, Brasil.
- Mooshammer, M., Wanek, W., Zechmeister-boltenstern, S., & Richter, A. (2014). Stoichiometric imbalances between terrestrial decomposer communities and their resources: mechanisms and implications of microbial adaptations to their resources. *Frontiers In Microbiology*, 5 (22), 1 -10.
- Nobre, C. A. & Marengo, J. A. (2017). *Mudanças Climáticas em Rede Um olhar interdisciplinar: contribuições do instituto nacional de ciência e tecnologia para mudanças climáticas*. Bauru: Canal 6 Editora, 612 p.

- Pantano, G., Grosseli, G. M., Mozeto, A. A., & Fadini, P. S. (2016). Sustainability in phosphorus use: a question of water and food security. *Química Nova*, 39(6), 732-740.
- Pavan, M. G., & Monteiro, F. A. (2014). Técnicas moleculares aplicadas à sistemática e ao controle vetorial. GALVAO C, *Organizador. Vetores da Doença de Chagas no Brasil. Sociedade Brasileira de Zoologia, Série Zoologia: Guias e Manuais de Identificação*. Curitiba, Brasil, 241-260.
- Reidinger, S., Ramsey, M. H., & Hartley, S. E. (2012). Análises rápidas e precisas de silício e fósforo em plantas usando um espectrômetro portátil de fluorescência de raios-X. *Novo Phytol*, 195(2012), 699 – 706.
- Rincón, L. E. C., & Gutiérrez, F. A. A. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 285-295.
- Rother, E.T. (2007). Revisão sistemática x revisão narrativa. *Acta Paulista de Enfermagem*, 20(2),1-6.
- Santos, A. A., Venceslau, S. S., Grein, F., Leavitt, W. D., Dahl, C., Johnston, D. T., & Pereira, I. A. (2015). A protein trisulfide couples dissimilatory sulfate reduction to energy conservation., *Science*, 350(6267), 1541-1545.
- Santos Júnior, D., Tarelho, L. V. G., Krug, F.J., Mílor, D. M. B. P., Martin Neto, L., & Vieira Júnior, N. D. (2006). Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma 200 Induzido por Laser (LIBS) – Fundamentos, aplicações e perspectivas. *Revista Analítica*, 24, 72-81.
- Short, M. A., Jenkins, R., Gould, R. W., & Gedcke, D. (1981). *Quantitative x-ray spectrometry*. New York, 11 (2) 586.
- Silva, M. K. V., & Oliveira, J. G. R. (2020). Experimentos de degradação do solo para abordagem nas aulas de geografia da educação básica. *Geographia Opportuno Tempore*, 6(1), 44-61.
- Smil, V. (2000). Phosphorus In The Environment: natural flows and human interferences. *Annual Review Of Energy And The Environment*. 25(1), 53-88.
- Souza, L. M. (2008). *Aplicações da espectrometria de massas e da cromatografia líquida na caracterização estrutural de biomoléculas de baixa massa molecular* (Tese de doutorado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- Stulen, I., & De Kok, Luit, J. (2012). Foreword: Exploring Interactions Between Sulfate and Nitrate Uptake at a Whole Plant Level. In: Luit J. De Kok, Tausz, M., Hawkesford, M.J., Hoefgen, R., McManus, M.T., Norton, R.M., Rennenberg, H., Saito, K., Schnug, E., Tabe, L. *Sulfur Metabolism in Plants*. Springer, 1-8.
- Susini, J., Joyeux, D., & Polack, F. (2003). *J. Phys. IV*, 104.
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., & Murphy, A. (2017). *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. Artmed.
- Thavamani, P., Samkumar, R. A., Satheesh, V., Subashchandrabose, S. R., Ramadass, K., Naidu, R., Venkateswarlu, K., & Megharaj, M. (2017). Microbes from mined sites: Harnessing their potential for reclamation of derelict mine sites. *Environmental Pollution*, 230, 495-505.
- Thieme, J., Sedlmair, J., Gleber, S. C., Prietzel, J., Coates, J., Eusterhues, K., Abbt-braun, G., & Salome, M. (2010). X-ray spectromicroscopy in soil and environmental sciences. *Journal Of Synchrotron Radiation*, 17(2), 149-157.
- Tortora, G. J., Funke, B. R., & Case, C. L. (2012). *Microbiologia*. Artmed.
- Vásquez, J. C. H. (2018). *Abundancia de grupos funcionales de microorganismos del suelo bajo cuatro sistemas de manejo agroecosistémico del municipio de Palmira (Valle del Cauca)* (Trabalho de conclusão de curso). Universidad Abierta y A Distancia, Palmira.
- Vieira, R. F. (2017). *Ciclo do Nitrogênio em Sistemas Agrícolas*. Embrapa.
- Willis, J. P., & Duncan A. R. (2008) *Understanding XRF Spectrometry. A training course in XRF Spectrometry*. PANalytical B.V., Netherlands, p. 9-9.