

# RESSALVA

Atendendo solicitação da autora,  
o texto completo desta tese será  
disponibilizado somente a partir  
de 30/09/2021



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
Câmpus de São José do Rio Preto

NÁTHALI MARIA MACHADO DE LIMA

**DIVERSIDADE E DISTRIBUIÇÃO DE CIANOBACTÉRIAS DE CROSTAS  
BIOLÓGICAS DO BIOMA CAATINGA COM BASE EM TAXONOMIA  
POLIFÁSICA E ANÁLISE METAGENÔMICA**

SÃO JOSÉ DO RIO PRETO

2020

NÁTHALI MARIA MACHADO DE LIMA

**DIVERSIDADE E DISTRIBUIÇÃO DE CIANOBACTÉRIAS DE CROSTAS  
BIOLÓGICAS DO BIOMA CAATINGA COM BASE EM TAXONOMIA  
POLIFÁSICA E ANÁLISE METAGENÔMICA**

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Microbiologia, junto ao Programa de Pós-Graduação em Microbiologia do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de São José do Rio Preto.

Financiadora: CAPES

Orientador: Prof. Dr. Luis Henrique Z. Branco  
Coorientador: Dr Miriam Muñoz Rojas

São José do Rio Preto  
2020

L732d

Lima, Náthali Maria Machado de

DIVERSIDADE E DISTRIBUIÇÃO DE CIANOBACTÉRIAS DE CROSTAS  
BIOLÓGICAS DO BIOMA CAATINGA COM BASE EM TAXONOMIA  
POLIFÁSICA E ANÁLISE METAGENÔMICA / Náthali Maria Machado de Lima. --

São José do Rio Preto, 2020

175 f. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências  
Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto

Orientador: Luis Henrique Zanini Branco

Coorientadora: Miriam Muñoz Rojas

1. Cianobactérias. 2. Caatinga. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Biociências Letras e Ciências  
Exatas, São José do Rio Preto. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

NÁTHALI MARIA MACHADO DE LIMA

**DIVERSIDADE E DISTRIBUIÇÃO DE CIANOBACTÉRIAS DE CROSTAS  
BIOLÓGICAS DO BIOMA CAATINGA COM BASE EM TAXONOMIA  
POLIFÁSICA E ANÁLISE METAGENÔMICA**

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Microbiologia, junto ao Programa de Pós-Graduação em Microbiologia do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de São José do Rio Preto.

Financiadora: CAPES

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Luis Henrique Zanini Branco  
UNESP – Câmpus de São José do Rio Preto  
Orientador

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Marli de Fátima Fiore  
USP – Universidade de São Paulo

Dr. Diego Bonaldo Genuário  
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Vera Regina Werner  
Museu de Ciências Naturais da Fundação Zoobotânica do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Watson Arantes Gama Júnior  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

São José do Rio Preto  
30 de setembro de 2020

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe Angela Priscila e meu pai João, que com muita luta puderam me proporcionar um ensino de qualidade. Ensino este que me deu a base para que hoje eu pudesse realizar esta defesa. Neste agradecimento incluo todos os colégios que passei, a UNESP e todos os meus professores, desde o ensino básico ao ensino superior, por terem mantido o ânimo e o amor por esta profissão tão desvalorizada em nosso país.

Agradeço à minha família, em especial ao meu avô Sezefredo Machado, por sempre me motivar aos estudos, ao conhecimento, à curiosidade e ao trabalho árduo. Tenho certeza que sua grande sabedoria serviu de exemplo a todos os membros de nossa família e alicerçou grande parte do que sou.

Agradeço os meus amigos Evelise, Ariane, Fábio, Luciana e Marcela por caminharem comigo por tantos anos, me proporcionando momentos leves e alegres durante toda a minha caminhada, além de torcerem por todas minhas realizações.

Agradeço então, ao núcleo mais diretamente relacionado a este trabalho, começando pelo meu orientador Luís Branco, com o qual caminhei por oito anos. Não fosse seu imenso conhecimento, paciência, dedicação e extrema atenção, eu com absoluta certeza, não seria capaz de desenvolver um trabalho como este. Deixo aqui estampada minha imensa gratidão e orgulho por este exímio professor, orientador e ídolo.

Agradeço aos meus colegas de laboratório, todos os que comigo passaram por essa jornada, Mariéllen, Mônica, Nádia, Bruna, Natália e Iago. Deixo então um abraço especial para a Natália, que foi a umas das últimas companheiras de guerra comigo, alegrando todos os meus dias no nosso querido BETA.

Também deixo meus agradecimentos especiais aqueles que participaram do meu último ano de doutorado, à minha coorientadora Miriam, que me deu todo suporte para vir à Austrália e realizar um ano em doutorado sanduíche, enriquecendo todo meu universo científico e acadêmico, sendo o melhor exemplo de mulher na ciência com quem eu poderia trabalhar, e me dando a oportunidade de continuar.

Agradeço também aos meus colegas de trabalho do BEES, meus queridos companheiros de trabalho Jana e Fred que tanto me ensinaram e ajudaram.

Por fim, agradeço à família que formei aqui na Austrália, Carol e Lívia, que me deram todo suporte para a redação desta tese, além de todo amor e alegria em todos os meus dias

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001\*, à qual agradeço imensamente por ambos os projetos que me foram proporcionados.

## Resumo

Crostas biológicas (CBs) consistem em uma comunidade de elementos entrelaçados composta por organismos poiquilótricos, como cianobactérias, algas verdes, microfungos, bactérias, líquens, musgos e microartrópodes. Estas comunidades exercem funções ecológicas importantes e ocorrem nas camadas superficiais do solo, em uma variedade de regiões climáticas ao redor do globo, principalmente em regiões áridas e semiáridas. As cianobactérias são componentes de extrema importância nessas comunidades, sendo consideradas pioneiras e responsáveis por estruturar a camada superior do solo, tornando possível a colonização por outros grupos. Embora as cianobactérias de CBs venham sendo bem estudadas, ainda há muita diversidade não acessada, principalmente na América do Sul. No Brasil, estes estudos estão praticamente restritos às regiões de Cerrado e os dados que foram encontrados até o momento ressaltam a necessidade de ampliação de estudos no país para que também haja o preenchimento de vazio de conhecimento em outros biomas. Dessa forma, a Caatinga, que é um ambiente restritivo, considerada uma das áreas mais quentes entre as regiões semiáridas do mundo e portanto, propício à presença de crostas biológicas, foi escolhida para ser explorada. As coletas foram feitas nos municípios de Cabaceiras, Barra de Santa Rosa e Pocinhos (Paraíba) em quatro localidades, onde amostras das crostas foram recolhidas segundo à metodologia padrão, ao longo de transeções de 200 m. Foram coletadas 10 amostras de crostas em cada local amostrado e também recolhidas porções de solo para a realização de análises de parâmetros físicos e químicos, como nitrogênio total, fósforo total, ortofosfato, matéria orgânica, pH, carbono orgânico e textura do solo. Temperatura, umidade relativa do ar e irradiância foram parâmetros medidos diretamente em campo. Uma parcela de solo de cada amostra foi separada e analisada quanto à presença de cianobactérias, e para cada população registrada foram feitas análises morfológicas e cultivos. Outra parcela de solo de cada amostra foi inoculada em meio de cultura, visando o estabelecimento de culturas de cianobactérias que não tivessem sido observadas anteriormente. As populações cultivadas e consideradas unicarianobacteriais tiveram seus materiais genéticos acessados por meio de extração, amplificação e sequenciamento. A última parcela de solo da amostra seguiu para análises metagenômicas, por meio de extração, amplificação e tecnologia de sequenciamento de próxima geração. Foram estudadas 26 populações, sendo nove a partir de amostras provenientes da natureza e outras 17 provenientes de cultivo e analisadas por critérios morfológicos e moleculares. Em todas as quatro localidades estudadas foram encontradas populações de *Scytonema* e *Microcoleus*, além de *Nostoc* também ter sido registrada em três das quatro regiões. *Microcoleus* e *Nostoc* foram analisados separadamente, por meio de estudos detalhados de filogenia e resultaram na descrição de seis novos gêneros e 12 novas espécies. A análise de NGS possibilitou uma investigação ecológica, que relacionou a distribuição dos grupos

de cianobactérias registradas a fatores ambientais, e também a comparação entre Caatinga e outro bioma propício à formação de crostas, o Pampa. A composição de cianobactérias registrada na Caatinga evidenciou a dominância de organismos adaptados à sobrevivência em ambiente com altas temperaturas e níveis de irradiância. Comumente encontrados em crostas em estágio de desenvolvimento avançado e apresentando uma relação positiva com compostos químicos essenciais para o solo, como fósforo e nitrogênio. Enfatizando assim, a importância das cianobactérias na nutrição dos solos e na consequente criação de condições favoráveis para o estabelecimento de organismos superiores. Como apêndice foram apresentados dados de um estudo realizado em parceria com um laboratório na Austrália. Neste trabalho foram aplicadas técnicas recentes que utilizam cianobactérias provenientes de crostas biológicas na conservação e restauração de espécies de plantas nativas.

Palavras-chave: Crostas biológicas. Ambientes restritivos. Diversidade em crostas. Bactérias fotossintetizantes.

## Abstract

Biological soil crusts (BSCs or biocrusts) consist of a community of elements that are interwoven and composed of poikilohydric organisms such as cyanobacteria, green algae, bacteria, lichens, mosses and microarthropods. These communities, which inhabit the top few centimeters of the soil, are responsible for important ecological functions. Biocrusts cover large parts of the soil surface in a broad range of habitats from a variety of climatic regions around the globe, mainly in arid and semiarid areas. Cyanobacteria are extremely important components of these communities, being considered their pioneers and responsible for structuring the soil biocrust and preparing it for the colonization by other organisms. Even though cyanobacteria from BSCs have been relatively well studied, a large part of their diversity is still unknown, especially in South America. Studies in Brazil are nearly restricted to the *Cerrado* region and data found so far highlights the need of further research in the country to improve knowledge from other biomes. Therefore, this study focused on the *Caatinga* biome, an extreme environment considered one of the hottest regions among the semiarid regions in the globe, being favorable to the presence of BSCs are broadly present. Sampling was carried out in the three cities: *Cabaceiras*, *Barra de Santa Rosa* and *Pocinhos* (*Paraíba* state) in four different localities, where biocrusts were sampled along 200 m transects following standard protocols. At each locality, a total of 10 samples were sampled, with an extra amount of soil collected for physical and chemical analysis, e.g. total nitrogen, total phosphate, organic matter, pH, organic carbon and soil texture. Temperature, air relative humidity and irradiance were measured in the field. Each soil sample was divided into three subsamples; the first one was used for the analyses of cyanobacteria populations, which were cultured and morphologically examined. A second subsample was inoculated in BG11 medium to promote the development of populations not observed before. The unicyanobacterial cultures had their DNA material extracted, amplified, and sequenced. The last subsample of each soil sample was used for metagenomic analyses, with extraction, amplification and sequencing through next-generation sequence technologies (NGS). We studied 26 populations, nine of which were observed directly after sampling, and 17 were cultivated and analyzed through morphological and molecular methods. *Scytonema* and *Microcoleus* were found in all the four studied localities, while *Nostoc* was registered in three of them. *Nostoc* and *Microcoleus* were submitted to a deep phylogenetic evaluation that resulted in the proposition of six new genera and 12 new species. The NGS analysis allowed an ecological investigation, relating the distribution of the registered cyanobacteria with environmental factors. It made possible the comparison among

*Caatinga* and another biome suitable to the development of biocrusts, called *Pampa*. The registered cyanobacterial composition in *Caatinga* was evidence that the dominant cyanobacteria were able to activate chemical pathways that allow their survival under high temperatures and high levels of irradiance. This group is common to biocrusts in a late stage of development and presents a positive relation with essential chemical compounds to the soil, e.g. phosphorus and nitrogen. This record highlights the importance of these communities in promoting a nutritional rich soil system able to harbor bigger organisms. The last component of this thesis brings results of a project developed in collaboration with an international research group in Australia. This study applied novel techniques harnessing cyanobacteria from biological soil crusts for promoting the conservation and restoration of native plants.

Keywords: Biological Soil Crusts. Extreme environments. Biocrust diversity. Photosynthetic bacteria.

## Sumário

<b>1 CAPÍTULO I - O QUE SÃO CROSTAS BIOLÓGICAS E POR QUE ESTUDÁ-LAS?</b>	<b>11</b>
1.1 Introdução geral	12
1.2 Hipóteses	16
1.3 Objetivos	17
1.4 Material e métodos	18
1.5 Referências	22
<b>2 CAPÍTULO II - CIANOBACTÉRIAS DE CROSTAS BIOLÓGICAS DA CAATINGA: IDENTIFICAÇÃO A PARTIR DE OBSERVAÇÃO DE MATERIAL PROVENIENTE DA NATUREZA E DE CULTIVO ARTIFICIAL</b>	<b>27</b>
2.1 Introdução	28
2.2 Material e métodos	30
2.3 Resultados e discussão	32
2.4 Conclusão	48
2.5 Referências	49
<b>CAPÍTULO III – NEW CYANOBACTERIAL GENERA FOUND IN BIOLOGICAL SOIL CRUSTS OF SAVANNA AND SEMI-ARID ENVIRONMENTS FROM SOUTH AMERICA</b>	<b>58</b>
3.1 Abstract	59
3.2 Introduction	60
3.3 Materials and methods	62
3.4 Results	66
3.5 Discussion	77
3.6 References	84
<b>4 CAPÍTULO IV – BIOLOGICAL SOIL CRUSTS: NEW GENERA AND SPECIES OF CYANOBACTERIA FROM BRAZILIAN SEMI-ARID REGIONS</b>	<b>92</b>
4.1 Abstract	93
4.2 Introduction	94
4.3 Materials and methods	96
4.4 Results	99
4.5 Discussion	116
4.6 References	119
<b>5. CAPÍTULO V – BIOCRUST CYANOBACTERIA COMPOSITION, DIVERSITY, AND ENVIRONMENTAL DRIVERS IN TWO CONTRASTING CLIMATIC REGIONS IN BRAZIL</b>	<b>129</b>
5.1 Abstract	130
5.2 Introduction	131

<b>5.3 Materials and Methods</b>	<b>133</b>
<b>5.4 Results</b>	<b>137</b>
<b>5.5 Discussion</b>	<b>145</b>
<b>5.6 Conclusion</b>	<b>147</b>
<b>5.7 References</b>	<b>149</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>164</b>
<b>APÊNDICE A - CONSERVATION OF NATIVE PLANTS WITH CYANOBACTERIA FROM BIOLOGICAL SOIL CRUSTS</b>	<b>166</b>

# **Capítulo I - O que são crostas biológicas e por que estudá-las?**

## 1.1 Introdução geral

As crostas biológicas (CBs) consistem em uma comunidade de elementos entrelaçados composta por organismos poiquiloídricos, como cianobactérias, algas verdes, microfungos, bactérias, líquens, musgos e microartrópodes (BELNAP et al., 2016). São também chamadas de biocrostas, crostas criptogâmicas, criptobióticas, microbióticas (BELNAP, 2002, 2005, 2006a; LANGHANS et al., 2009). Ocorrem nas camadas superficiais do solo, em uma variedade de regiões climáticas ao redor do globo e se estabelecem em áreas onde a cobertura vegetal é escassa o suficiente para que a luz solar atinja a superfície (BELNAP, 2005). Sendo assim, elas são mais comuns em zonas áridas, que são regiões que compreendem mais de 40% da superfície da Terra, o que faz com que as CBs sejam os elementos mais característicos da superfície terrestre (BELNAP et al., 2016).

As CBs também apresentam importantes contribuições ecológicas nos ambientes onde desenvolvem-se, por exemplo:

O entrelaçamento das cianobactérias e microfungos agrega partículas de solo e forma uma crosta firme que dá estabilidade e protege o solo contra forças erosivas, que são causadas pelo vento ou precipitações (BELNAP, 2005).

A estabilização do solo também é favorecida pela presença dos exopolissacarídeos produzidos pelos organismos colonizadores das CBs, resultando, também, na agregação de partículas de solo (GUNDLAPALLY & GARCIA-PICHEL, 2006).

Em desertos frios, a presença das crostas proporciona acúmulo e maior tempo de residência da água no solo, aumentando a quantidade e profundidade da infiltração (BELNAP, 2005). Além disso, as CBs contribuem na fixação de nitrogênio e carbono (BELNAP, 2002, 2005, 2006b).

Sabe-se que, na formação das crostas biológicas, as cianobactérias são os primeiros organismos a colonizar (GARCIA-PICHEL & WOJCIECHOWSKI, 2009) e estabilizar o solo, tornando possível o estabelecimento de outros organismos (GARCIA-PICHEL et al., 2016). Grande parte dos estudos considera como pioneiras as cianobactérias filamentosas, móveis e que se organizam em “formato de corda” (GARCIA-PICHEL & WOJCIECHOWSKI, 2009). Entretanto, em estudo de diversidade feito com crostas do Cerrado brasileiro, cianobactérias que não se organizam em “formato de corda”, como *Leptolyngbya* Anagnostidis et Komárek e *Porphyrosiphon* Kützing ex Gomont foram encontradas como as mais frequentes, indicando que sejam colonizadoras primárias neste ambiente (MACHADO-DE-LIMA et al., 2019).

Belnap & Eldridge (2003) propuseram que a sequência sucessional esperada para crostas

biológicas de regiões áridas e semiáridas tem início com a colonização por cianobactérias e algas, seguidas pela instalação de líquens, e posteriormente, por várias colonizações de briófitas e líquens. Na maioria das sucessões, não é esperada a substituição total de um grupo de organismos por outro, mas a adição de espécies à comunidade com mudança nas abundâncias relativas ao longo do tempo (WEBER et al., 2016).

CBs de desertos quentes são dominadas por cianobactérias, enquanto as de desertos frios são dominadas por líquens e musgos (BELNAP, 2005). Em algumas localidades, as CBs dominadas por cianobactérias podem cobrir até 95% da superfície do solo, como observado no Kalahari (Botsuana), por Thomas & Dougill (2007). Nos desertos, onde a maioria das chuvas cai nas estações frias, predominam cianobactérias do gênero *Microcoleus* Desmazières ex Gomont e, em desertos quentes com verões chuvosos, os gêneros *Scytonema* Agardh ex Bornet & Flahault, *Nostoc* Vaucher ex Bornet & Flahault e *Schizothrix* Kützing ex Gomont são predominantes (BELNAP, 2005). Esses gêneros apresentam adaptações importantes para a sobrevivência neste tipo de ambiente, como por exemplo, a capacidade de movimentação e migração dos tricomas de *Microcoleus* para as camadas inferiores do solo quando a superfície se torna seca (GARCIA-PICHEL et al., 2001) e até mesmo movimentos horizontais (SOROCHKINA et al., 2018). A presença de pigmentação nas bainhas de *Scytonema* também permite aos indivíduos manterem-se como colonizadores de topo de crostas e se protegerem do contato direto com a radiação UV (GARCIA-PICHEL et al., 2003).

Outra contribuição relevante das crostas biológicas está relacionada aos fluxos de nutrientes, em especial de carbono e nitrogênio. A fixação de carbono pelas crostas biológicas é feita por meio do processo de fotossíntese (SANCHO et al., 2016). Esta contribuição atua tanto em escala local quanto global, pois estimativas recentes apontam que coberturas criptogâmicas (crostas que recobrem plantas e rochas, além das de solo) produzem cerca de 6 a 7% da produção anual estimada das vegetações terrestres (ELBERT et al., 2012). Já o processo de fixação de nitrogênio atmosférico, em ambientes áridos, é predominantemente feito por crostas biológicas (EVANS & EHLERINGER, 1993) e diversos estudos têm demonstrado a atuação das cianobactérias na fixação de nitrogênio e na liberação de compostos nitrogenados para o ambiente (BELNAP et al., 2002; YEAGER et al., 2004, 2007; STRAUSS et al., 2012; ABED et al., 2013; RODRIGUES-CABALLERO et al., 2018).

Pelos motivos apresentados, é possível perceber a importância do estudo de cianobactérias nessas comunidades. Nos últimos anos, tem havido grandes investimentos na investigação de crostas biológicas, o que pode ser constatado pela duplicação no número de

gêneros registrados em crostas ao redor do mundo (BÜDEL et al., 2016), além dos novos gêneros e espécies descritos com base em organismos encontrados em CBs (FLECHTNER et al., 2002; ŘEHÁKOVÁ et al., 2007; FLETCHNER et al., 2008; DADHEECH et al., 2012; MÜHLSTEINOVÁ et al., 2014; BECERRA-ABSALÓN et al., 2018, MARTINS et al., 2018).

Entretanto, embora as crostas biológicas venham sendo bem estudadas, ainda há muita diversidade não acessada, e esta diversidade precisa ser investigada, pois apenas um sólido embasamento a respeito dos organismos presentes nas crostas biológicas permitirá a compreensão das funções dessas comunidades (GARCIA-PICHEL, 2001). Neste sentido, Büdel et al. (2016) fizeram um levantamento das principais regiões que precisam ser exploradas quando à riqueza de cianobactérias e enfatizaram as Américas, em especial a América do Sul, como as regiões mais carentes de investigação.

Com o objetivo de contribuir com o conhecimento na América do Sul, crostas biológicas de regiões de Cerrado brasileiro vêm sendo investigadas desde 2014. Até o momento, os estudos foram feitos em sete áreas localizadas nos estados de Minas Gerais e São Paulo.. O levantamento da diversidade de cianobactérias de crostas registrou grande quantidade de gêneros comuns a crostas biológicas de outras localidades mundiais, como são os casos de *Nostoc*, *Scytonema*, *Stigonema*, *Calothrix*, *Microcoleus*, *Leptolyngbya*, *Schizothrix* e *Phormidium*. Entretanto, muitas populações morfológicamente estudadas não foram identificadas em nível específico e outras foram descritas como gêneros novos, comprovando a presença de grupos ainda desconhecidos para ambientes pouco explorados (MACHADO-DE-LIMA, 2016; MACHADO-DE-LIMA et al. 2019). Análises mais detalhadas, com abordagem metagenômica, em seis regiões de Cerrado e realizadas com base em metodologia de sequenciamento de próxima geração (SPG) provaram que embora no Cerrado haja gêneros comuns a crostas de diferentes localidades, a composição das assembleias de cianobactéria (grupo de gêneros presentes) de cada uma dessas regiões é única. Observou-se, também, que os gêneros *Leptolyngbya* e *Porphyrosiphon* foram os mais frequentes, diferentemente da maioria dos estudos com crostas de outras regiões do mundo onde predominam espécies dos gêneros *Microcoleus* e *Trichocoleus* (MACHADO-DE-LIMA et al., 2019).

Considerando estes importantes dados registrados no Cerrado e o recente início das investigações com crostas biológicas no Brasil, fica evidente que, para o preenchimento deste vazio de conhecimento, é necessária a ampliação de estudos no país. Dessa forma, a Caatinga, um ambiente restritivo e propício à presença de crostas biológicas, foi um bioma escolhido para ser explorado quanto à diversidade de cianobactérias presentes em tais comunidades.

Devido à importância e recorrência nos ambientes amostrados de populações apresentando características morfológicas de *Microcoleus* e *Nostoc*, estes foram analisadas separadamente, por meio de estudos detalhados de filogenia. O estudo de *Nostoc* incluiu populações reportadas em trabalho anterior (Machado-de-Lima, 2016) e provenientes de crostas biológicas do Cerrado brasileiro. Os resultados relativos a essas abordagens compõem dois capítulos desta tese (Capítulos III e IV).

## **Considerações Finais**

Esta investigação contou com metodologias dependentes e independentes de cultivo e enfatizou como ambas são complementares, trazendo diferentes resultados e, assim, explorando melhor a diversidade do ambiente.

Comprovando a primeira hipótese deste trabalho, os resultados obtidos a partir das técnicas dependentes de cultivo demonstraram o quanto a flora de cianobactérias dos solos da Caatinga é diversificada e ainda desconhecida, principalmente pelo grande número de gêneros e espécies novas apresentados ao longo do trabalho. Estes resultados juntamente com dados de Cerrado, levaram à produção de dois trabalhos a serem publicados, que validam a terceira hipótese desta tese. O primeiro capítulo trouxe a proposição de três novos gêneros e seis novas espécies de cianobactérias filamentosas morfológicamente similares a *Microcoleus* e *Phormidium* e o segundo a descrição de três novos gêneros e seis novas espécies de cianobactérias similares a *Nostoc*.

Confirmando a segunda hipótese deste trabalho, os dados obtidos por Sequenciamento de Próxima Geração trouxeram uma investigação mais profunda a respeito da composição de cianobactérias da Caatinga, permitindo a comparação com o bioma Pampa. Esta comparação mostrou um posicionamento distante da Caatinga em relação ao Pampa, e descreveu três composições diferentes, uma para cada região analisada dentro do bioma. Como um segundo resultado desta análise, foram identificadas as variáveis ambientais que mais influenciam na distribuição de cianobactérias de ambos os biomas.

A ciência básica traduzida no levantamento sistemático das cianobactérias dos solos da Caatinga, juntamente com a descrição de novas espécies e gêneros e o conhecimento de como a comunidade de cianobactérias está sendo dirigida, permitirá o desenvolvimento de projetos voltados à aplicação de cianobactérias em solo, com fins de conservação e restauração ambiental.

## References

BATEMAN, A./ LEWANDROWSKI, W./ STEVENS, J. C. & MUÑOZ-ROJAS, M. Ecophysiological indicators to assess drought responses of arid zone native seedlings in reconstructed soils. *Land Degradation & Development*, 29(4): 984-993. 2018.

BROAD, L. & COATES, D. Plant conservation in Australia: Current directions and future challenges. *Plant Diver.* v. 39, n. 6, p. 348-356. 2017.

GARCIA-PICHEL, F.; LOZA, V.; MARUSENKO, Y.; MATEO, P. & POTRAFKA, R. M. Temperature drives the continental-scale distribution of key microbes in topsoil communities. *Science*. v. 340, p.1574– 1577. 2013.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. Available from: <http://www.mma.gov.br/informma/item/15111-mma-apresenta-a%C3%A7%C3%B5es-contra-a-desertifica%C3%A7%C3%A3o.html> (Accessed August 2020).

MUNÓZ-ROJAS, M.; CHILTON, A.; LIYANAGE, G. S.; ERICKSON, T. E.; MERRITT, D. J.; NEILAN, B. A. & OOI, M. K. J. Effects of indigenous soil cyanobacteria on seed germination and seedling growth of arid species used in restoration. *Plant Soil*. v. 429, p. 91-100. 2018.

PLEIN, M; BODE, M.; MOIR, M. L. & VESK, P. Translocation strategies for multiple species depend on interspecific interaction type. *Ecological Applications*. v. 26, n. 4., 1186-1197. 2016.

POINTING, S. B. & BELNAP, J. Microbial colonization and controls in dryland systems. *Nature Reviews Microbiology*. v. 10, p. 551-562. 2012.

VIEIRA, R. M. S.; TOMASELLA, J.; ALVALÁ, R. C. S.; SESTINI, M. F.; AFFONSO, A. G.; RODRIGUEZ, D. A.; BARBOSA, A. A.; CUNHA, A. P. M. A.; VALLES, G. F.; CREPANI, E.; DE OLIVEIRA, S. B. P.; DE SOUZA, M. S. B.; CALIL, P. M.; DE CARVALHO, M. A.; VALERIANO, D. M.; CAMPELO, F. C. B. & SANTANA, M. O. Identifying áreas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. *Solid Earth*. 6: 347-360. 2015.