

Research, Society and Development, v. 9, n. 2, e55921962, 2020
(CC BY 4.0) | ISSN 2525-3409 | DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i2.1962>

Uma breve síntese dos aspectos biofísicos das bactérias magnetotáticas e sua relação com a astrobiologia através da terraformação

A brief summary of the biophysical aspects of magnetotactic bacteria and their relationship to astrobiology through terraforming

Un breve resumen de los aspectos biofísicos de las bacterias magnetotáticas y su relación con la astrobiología a través de la terraformación

Recebido: 30/10/2019 | Revisado: 31/10/2019 | Aceito: 11/11/2019 | Publicado: 13/11/2019

Bruno Leonardo do Nascimento-Dias

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3632-9073>

Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil

E-mail: bruno.astrobio@gmail.com

Resumo

As bactérias magnetotáticas são gram-negativas, capazes de responder a campos magnéticos e apresentam características interessantes relacionadas à sua versatilidade biofísica e metabólica. O objetivo desta pesquisa é sugerir que esses microrganismos, devido a essas características, possam participar juntamente do processo de terraformação com outros microrganismos extremofílicos fotossintéticos. A magnetotática tem uma distribuição cosmopolita e é onipresente em ambientes aquáticos microaeróbicos. Embora as bactérias magnetotáticas sejam historicamente relacionadas ao meteorito ALH 84001 como uma espécie de bioassinatura ou como um possível registro fóssil de Marte, esse problema não será abordado neste trabalho. Uma breve revisão das bactérias magnetotáticas e como elas podem ser relacionadas em um possível processo de terraformação em Marte ou em outros planetas será apresentada de forma sucinta. Por fim, é importante enfatizar que esse tema evoluiu muito ao longo do tempo, de uma história de ficção científica para um domínio e contexto verdadeiramente científico. Finalmente, espera-se que este trabalho sirva de motivação e base para futuras pesquisas, a fim de contribuir para a disseminação da astrobiologia.

Palavras-chave: bactérias magnetotáticas; astrobiologia; diversidade; Marte; terraformação.

Abstract

Magnetotactic bacteria are gram negative, capable of responding to magnetic fields and have interesting characteristics related to their biophysical and metabolic versatility. The aim of this research is to suggest that these microorganisms, due to these characteristics, may participate together in the terraforming process with other photosynthetic extremophilic microorganisms. Magnetotactic has a cosmopolitan distribution and is ubiquitous in microaerobic aquatic environments. Although magnetotactic bacteria are historically related to the ALH 84001 meteorite as a species of biosignature or as a possible fossil record from Mars, this problem will not be addressed in this paper. A brief review of the magnetotactic bacteria and how they may be related in a possible terraforming process on Mars or other planets will be briefly presented. Finally, it is important to emphasize that this theme has evolved greatly over time, from a science fiction story to a truly scientific domain and context. Finally, it is hoped that this work will serve as motivation and basis for future research in order to contribute to the spread of astrobiology.

Keywords: magnetotactic bacteria; astrobiology; diversity; Mars; terraforming.

Resumen

Las bacterias magnetotáticas son gramnegativas, capaces de responder a los campos magnéticos, y han presentado características interesantes relacionadas con su versatilidad biofísica y metabólica. El objetivo de esta investigación es sugerir que estos microorganismos debido a estas características, es posible que estos microorganismos puedan participar en conjunto del proceso de terraformación con otros microorganismos extremófilos fotosintéticos. Las magnetotáticas tienen una distribución cosmopolita y son omnipresentes en ambientes acuáticos microaerobios. Aunque las bacterias magnetotáticas estén históricamente relacionadas con el meteorito ALH 84001 como una especie de biofirma o como un posible registro fósil marciano, este tema no será abordado. Se presentará de manera sucinta una breve revisión sintetizada sobre las bacterias magnetotáticas y cómo podrían relacionarse en un posible proceso de terraformación en Marte o en otros planetas. Finalmente, es importante enfatizar que este tema ha evolucionado mucho con el tiempo, de ser una historia de ciencia ficción a un dominio y contexto verdaderamente científico. Por fin, se espera que de la discusión este trabajo sirva como motivación y base para futuras investigaciones, con el fin de contribuir a la difusión de la astrobiología.

Palabras clave: bacterias magnetotáticas; astrobiología; diversidad; Marte; terraformación.

1. Introdução

A interação dos seres vivos com o ambiente é um processo dinâmico. De acordo com Lins de Barros, Esquivel & Farina (1990), um exemplo deste dinamismo seria a interação que existe entre os seres vivos e o campo geomagnético. Vale ressaltar que diversos organismos também possuem essa capacidade de sentir o campo magnético da Terra e utilizá-lo como mecanismo de orientação (Blakemore, 1975; Frankel, 1984). Inclusive, essa interação pode ser um fator evolutivo proeminente de adaptação entre as espécies (Kirschvink, Jones & MacFadden, 1985).

Dentre os seres vivos capazes de sentir o campo geomagnético, há um grupo de bactérias, denominadas magnetotáticas, que tem chamado a atenção há algum tempo. Por volta de 1963, o microbiólogo italiano Salvatore Bellini relatou pela primeira vez a existência de bactérias magnéticas em uma publicação no Instituto de Microbiologia da Universidade de Paiva, na Itália, que não teve repercussão internacional (Bellini, 2009). Em seu estudo, Bellini observou que certas bactérias migravam de maneira constante em direção ao pólo norte. Com base em suas observações, pensava que a célula dessas bactérias possuía um tipo de “bússola interna” e as nomeou de bactérias de magnetossensíveis. Anos mais tarde, em 1975, o norte-americano Richard Blakemore redescobriu essas bactérias, publicando-as oficialmente e as renomeou de magnetotáticas (Blakemore, 1975).

As bactérias magnetotáticas (MTB, sigla em inglês) possuem distribuição cosmopolita e são onipresentes em ambientes aquáticos microaeróbicos. Originalmente, assume-se isto, pois até o momento MTB são observadas exclusivamente em colunas de água ou, de acordo com Stolz (1993), em sedimentos com estratificação química vertical. Entretanto, Fassbinder et al. (1990) relatam que MTB também podem ser encontradas em solos terrestres alagados.

A principal característica das MTB é a capacidade de sintetizar nanopartículas ricas em Ferro (Fe) em seu citoplasma chamadas de magnetossomos (Blakemore, 1975). Essas nanopartículas podem ser de dois tipos de minerais: magnetita (Fe_3O_4) ou greigita (Fe_3S_4) (Gorby, Beveridge & Blakemore, 1988). Em geral, estão organizados em cadeias magnéticas ou segmentos, por isso, são dipolos magnéticos, funcionando como uma espécie de bússola intracelular. Destarte, os magnetossomos são considerados as estruturas responsáveis pela orientação dessas bactérias ao longo das linhas do campo geomagnético.

Além disso, é importante ressaltar o fenômeno da magnetotaxia presente nesses microrganismos (Frankel, 1984). Este denota a motilidade celular dirigida por um campo magnético. Taxis implica que o campo magnético influencia a direção da natação, mas não a velocidade absoluta das células magnetotáticas (Lins de Barros, Esquivel & Farina, 1990).

Assim, os estudos relacionados às bactérias magnetotáticas demonstram ter valores para diversas áreas, tais como Astrobiologia, Microbiologia, Evolução, Bioquímica, Física, Paleontologia e Etologia, além de campos emergentes. Sendo assim, é importante frisar como este assunto é rico e, notoriamente, atravessa de forma inerente os limites dos conhecimentos tradicionais.

Diante deste contexto, este artigo tem como objetivo sugerir que as bactérias magnetotáticas possam ter participação no processo de terraformação por meio de relações protooperativas com outros microrganismos, como os extremofílicos e fotossintéticos.

2. Metodologia

Este trabalho foi desenvolvido por uma abordagem qualitativa, aplicando o procedimento metodológico de pesquisa bibliográfica.

A abordagem qualitativa é aquela no qual o pesquisador é o principal instrumento de coleta de dados e no qual se destaca a interpretação do pesquisador sobre o fenômeno em estudo (Pereira et al. (2018).

Segundo Fonseca (2002), a pesquisa bibliográfica ocorre através do levantamento de referências teóricas já analisadas e publicadas, como livros, artigos científicos, páginas de *websites*, com o objetivo de coletar informações sobre o problema a ser estudado.

3. Resultados e Discussão

Magnetossomos e sua relação com as MTB

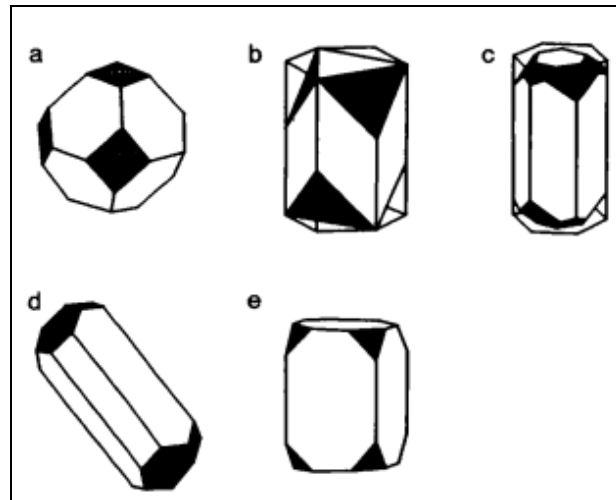
Os magnetossomos são os principais componentes das MTB, pois são estruturas fundamentais para o estilo de vida magnetotático (Lins de Barros, Esquivel & Farina, 1990). As informações sobre a síntese de nanopartículas de Fe nas MTB são praticamente todas baseadas em estudos envolvendo duas espécies do gênero *Magnetospirillum* (*Ms. gryphiswaldense* e *Ms. magneticum*) que biomineralizam magnetossomas de magnetita cubo-octaédrica.

O que chama a atenção na biomineralização do magnetossoma em ambas as espécies é que parece ser um processo complexo que envolve várias etapas e que se sobrepõem temporalmente durante o tempo de vida da célula (Lefèvre & Bazylinski, 2013).

As morfologias dos cristais dos magnetossomos variam, mas, via de regra, são uniformes entre as células de uma mesma espécie (Bazylinski, Garrat-Reed & Frankel, 1994).

Na Figura 1, a seguir, são apresentadas ilustrações dos tipos morfológicos de nanocristais observadas nas MTB.

Figura 1 – Exemplos dos tipos morfológicos dos nanocristais



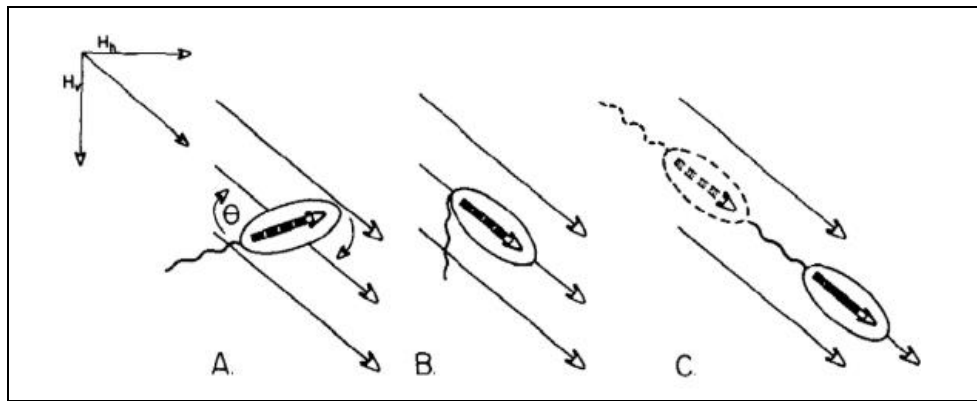
Fonte: adaptado de Mann et al. (1990)

Em geral, elas são: a) cubo-octaedro ou “cuboides” (Balkwill, Maratea & Blakemore, 1980); (b, c) variações de prismas hexagonais (Towe & Moench, 1981); (d) cubo-octaedro alongado; (e) prisma retangular alongado (Mann, Sparks, Board, 1990).

Taxis: os diferentes tipos de orientação

A magnetotaxia é uma importante função de orientação utilizada por esses microrganismos. Segundo Blakemore (1982), as MTB sempre migram para baixo, direcionando-se para o sedimento e para longe da superfície, onde a concentração de oxigênio é alta, como ilustra a Figura 2.

Figura 2 – Representação da orientação e direcionamento das MTB em relação ao campo magnético



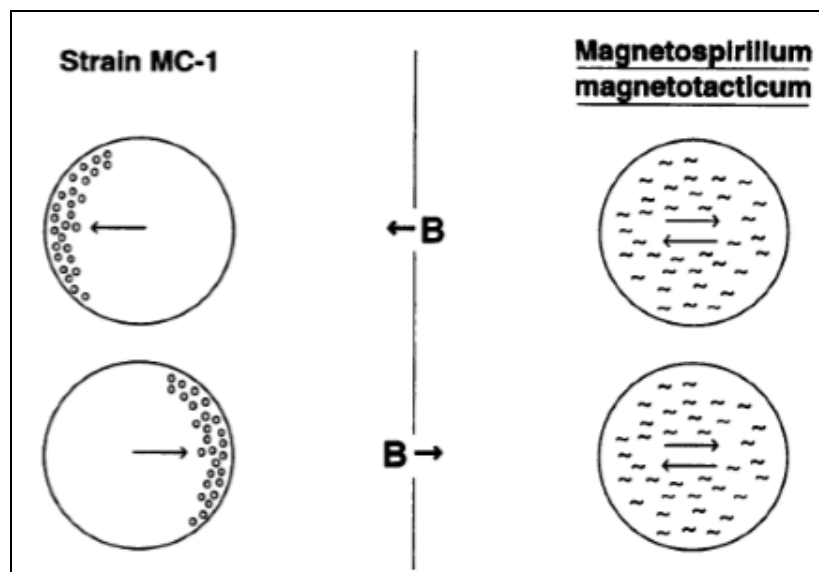
Fonte: Blakemore (1982)

Na Figura 2 é apresentada como as bactérias magnetotáticas se direcionam por conta de sua sensibilidade em relação ao campo magnético local. Em geral, infere-se que este tipo de comportamento de bactérias magnetotáticas também tenha alguma relação com pelo menos um dos seguintes processos: Quimiotaxia, Aerotaxia, Fototaxia.

Quimiotaxia

Embora as MTB não sejam consideradas bactérias quimiotáticas, no geral, elas realizam um processo migratório sempre em sentido oposto ao gradiente químico do oxigênio. Todavia, ao contrário das bactérias quimiotáticas que possuem mobilidade do tipo *run and tumble*, a maioria das bactérias magnetotáticas se movem bidirecionalmente no campo magnético (Figura 3).

Figura 3 - Ilustração comparando o comportamento, no hemisfério Norte, de bactérias tipo coccus e espirilo em uma gota d'água.



Fonte: Martins (2007)

Bactérias do tipo coccus migram e acumulam-se na borda da gota, enquanto as bactérias tipo espirilo alinham-se ao campo (B), porém migram para ambos os lados.

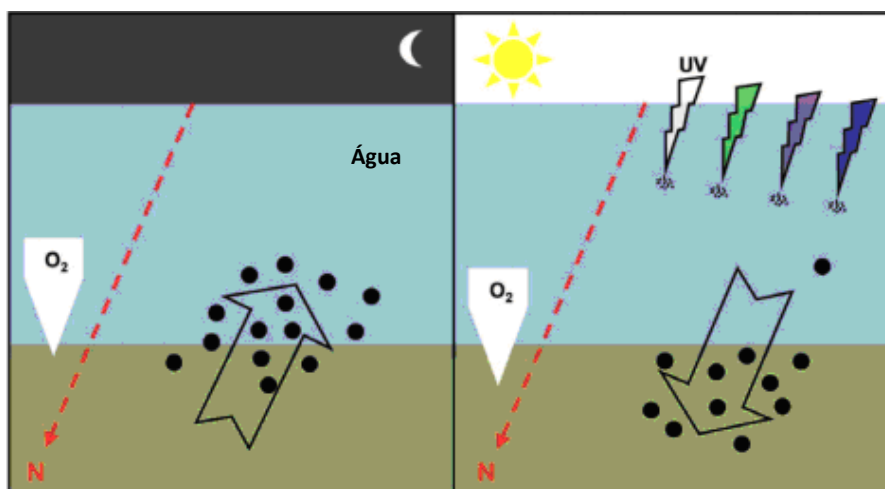
Aerotaxia

A direção de migração ao longo do campo magnético, segundo a hipótese da magneto-aerotaxia, é determinada pela direção da rotação flagelar (no sentido horário ou anti-horário), que por sua vez é determinada pela resposta aerotática da célula (Frankel, Williams & Bazylinski, 2007; Lefèvre & Bazylinski, 2013). De acordo com Frankel et al. (1997), a aerotaxia e a magnetotaxia devem atuar juntas nas MTB como um tipo de comportamento sensorial.

Fototaxia

O processo de movimento migratório devido a influência da luz, ou seja, perturbação ou orientação por conta de uma determinada frequência de onda, é denominado de fototaxia. Esse tipo de mecanismo pode servir, por exemplo, para evitar a exposição à luz quando as concentrações de oxigênio na camada fótica são muito baixas para desencadear uma reversão. De acordo com Lefèvre & Bazylinski (2013), o microrganismo multicelular magnetotático (MMP, sigla em inglês) *Candidatus Magnetoglobus multicellularis* possui fototaxia negativa (Figura 4).

Figura 4 - Diagrama do comportamento migratório proposto dos MMPs no hemisfério norte



Fonte:

Nota-se através da figura uma atribuição de comportamento diferenciado entre os períodos diurnos e noturno das bactérias magnetotáticas. Sugere-se que, durante condições de baixa luminosidade (por exemplo, à noite), o MMP é proposto para exibir o comportamento de procura do Sul, migrando para cima em direção à interface água-sedimento ou na coluna de água sobrejacente.

A biofísica de bactérias magnetotáticas

Dentre os melhores dados relacionados ao comportamento de sensibilidade magnética e a presença do mineral óxido de ferro (Fe_3O_4) é em bactérias aquáticas que se orientam e nadam ao longo das linhas de campo magnético (Blakemore e Frankel, 1981). De acordo com Frankel (1984), a física do mecanismo de orientação das MTB está diretamente relacionada ao tamanho e a estrutura organizacional das cadeias de nanopartículas de Fe_3O_4 .

No geral, a cadeia de magnetossomos em MTB transmite um momento dipolar magnético permanente à célula, paralelo ao eixo de movimentação. Esse processo é o suficiente para orientar a célula e fazê-la se comportar como uma agulha de bússola que se alinha ao longo do campo magnético da Terra (Blakemore & Frankel, 1981).

Essas partículas geradoras de momento dipolar, quando agrupadas, formam domínios magnéticos (Frankel, 1984). Esse fenômeno é separado por regiões de transição ou por paredes de domínio pode ser calculado a partir de:

$$d_w = \left(\frac{kT_c}{Ka^3} \right)^{1/2} a, \quad (1)$$

k = Constante de Boltzmann

K = Energia de anisotropia

a = espaçamento atômico

T_c = Temperatura de Curie

Desse modo, a largura de uma parede de domínio d_w é posta como uma função da energia de troca e anisotropia da matéria. Além disso, é importante enfatizar que a hipótese mais simples para existir uma orientação magnética é a necessidade de energia da interação magnética entre o organismo e o campo magnético. Isto pode ser descrito matematicamente, de acordo com Margato, Santos & Lins de Barros (2007), por:

$$E = - M.B.\cos\theta \quad (2)$$

De acordo com Frankel (1984), as bactérias possuem um comportamento magnético de orientação passiva, isto é, não são atraídas ou repelidas pelo campo magnético, mas são orientadas e se locomovem devido à propulsão flagelar. É possível estimar a velocidade de migração ao longo da linha do campo magnético através de:

$$V_b = V_0 < \cos\theta > \quad (3)$$

onde V_0 é a velocidade de avanço da bactéria nadadora e θ é o ângulo entre o eixo de motilidade e o campo magnético.

MTB e Astrobiologia

De acordo com Bazylnski & Lefèvre (2013) foram observadas em MTB condições de extremofilia, isto é, a capacidade de tolerar e sobreviver em ambientes considerados hostis para a grande maioria das espécies conhecidas na Terra (Averner & MacElroy, 1976).

Serão apresentados como as pesquisas com MTB podem se relacionar em processos de terraformação de Marte ou em outros planetas. Antes de tudo, é importante dizer que essa temática evoluiu muito com o passar do tempo, deixando de ser uma história de ficção científica para um domínio e contexto realmente científico (Sagan, 1973; Averner & MacElroy, 1976; Fogg, 1989, 1993, 1998; Zubrin & McKay, 1997; McKay & Marinova, 2001).

As MTB têm apresentado particularidades interessantes relacionadas à sua versatilidade metabólica e que, por conta disso, poderiam participar em conjunto do processo de terraformação com outros microrganismos fotossintéticos e/ou extremofílicos. De acordo com Fogg (1995), terraformação é um processo de (bio)engenharia planetária, especificamente dirigido a aumentar a capacidade de um ambiente planetário extraterrestre para suportar a vida.

Tabela 1 – Alguns dados básicos da atmosfera marciana.

Principais constituintes atmosféricos	Valor
CO ₂	0,95
N ₂	0,027
Ar	0,016

H ₂ O	0,0003
O ₂	0,0013
CO	700 ppm
NE	2,5 ppm

Fonte: Owen et al. (1977); Hartmann et al. (2001).

Atualmente, devido às diversas missões desenvolvidas, é de conhecimento que a atmosfera marciana é relativamente fina, sendo composta majoritariamente por gás carbônico (CO₂), além de pequenas porções de Nitrogênio (N₂), Argônio (Ar) e outros compostos apresentados na Tabela 1 (Owen et al. 1977; Hartmann et al. 2001).

Com base na composição atmosférica marciana, que se apresenta como um ambiente extremamente hostil, as MTB poderiam ter um papel importante no processo de terraformação, pois alguns desses microrganismos são quimiolitotópicos e utilizam o dióxido de carbono, que é tóxico para os seres humanos, como a única fonte de carbono para a síntese de seus componentes celulares (Bazylinski et al., 2004).

Além disso, segundo Williams et al. (2006), a MTB MC-1 parece ser capaz de fixar CO₂ via ciclo reverso de Krebs. Este processo bioquímico provavelmente geraria ácidos sulfídricos e sulfetos. Desse modo, juntamente com a MC-1, poderiam ser utilizadas bactérias fotossintéticas anoxigênicas, incluindo cianobactérias anoxigênicas facultativas. O intuito é que essas bactérias anoxigênicas utilizem os íons de sulfetos como fonte de elétrons para o seu metabolismo celular, o que permitiria a ocorrência da redução do dióxido de carbono durante a síntese de compostos orgânicos. Assim, a utilização destas MTB possui relevância para os estágios iniciais do processo de terraformação.

De acordo com Blakemore (1982), as MTB poderiam participar não apenas do ciclo do carbono como também do ciclo de ferro. Resumidamente, esses microrganismos sintetizam magnetossomos que podem chegar a acumular cerca de 3% de ferro em relação a seu peso seco. Por conta disto, as MTB seriam potenciais participadoras da ciclagem de ferro.

Por fim, MTB também podem atuar no ciclo de nitrogênio, um dos mais importantes em nossa biosfera. O nitrogênio (N) é usado pelos seres vivos de maneira essencial em seu desenvolvimento. Apesar do N ser predominante em nossa atmosfera, os vegetais são capazes de aproveitá-lo apenas na forma de amônia (NH₃) ou nitrato (NO₃⁻), e os animais na forma de aminoácidos. Desse modo, devido as MTBs possuírem metabolismo versátil, segundo

Bazylinski e Blakemore (1983), seriam capazes de fixar nitrogênio molecular. Assim, poderiam atuar como um “gargalo biológico”, disponibilizando nitrogênio a outros organismos incapazes de realizar esse tipo processo (Bazylinski et al., 2000).

Assim, com base nos argumentos apresentados, esses microrganismos podem juntamente com outras bactérias fotossintetizantes contribuir no processo de terraformação.

5. Considerações Finais

Aparentemente, é plausível sugerir que bactérias magnetotáticas possuem aspectos astrobiológicos e conexões que podem ser relacionar não apenas com os estudos sobre passado de Marte, mas também com pesquisas voltadas para o presente e futuro do planeta vermelho. Esses microrganismos atravessam de forma inerente os limites dos conhecimentos tradicionais. O desenvolvimento de pesquisas relacionadas com as MTB pode auxiliar em áreas como bioengenharia e biotecnologia.

Assim, é preciso mais investimento em pesquisas com MTB, com o apoio maior em pesquisas biofísicas e genéticas com foco em diversidade e ecologia de MTB. Um aprofundamento e aprimoramento de informações sobre biogeografia e de enzimas produzidas por estas MTB extremofílicas podem gerar conhecimento para a Física e outras diversas ciências aplicadas. Além disso, é preciso que mais pesquisas na Física sejam incentivadas, afim de obter mais informações a respeito sobre os fenômenos de magnetotaxia e a biofísica desses microrganismos.

Ademais, com a busca antropocêntrica de colonizar Marte, pode se dizer, por fim, que a utilização de MTB em processos de terraformação juntamente com outras bactérias, também parece um modelo representativo plausível a ser considerado. Principalmente, em casos de montagens de modelos estruturais baseadas em ecopoiese.

Por fim, espera-se que este trabalho sirva de motivação e de base para futuras pesquisas, de forma a contribuir para a divulgação deste campo fértil e promissor que é a Astrobiologia.

Agradecimentos

O autor gostaria de agradecer aos revisores responsáveis em auxiliar no suporte do aprimoramento do trabalho. Agradecer as agências de fomento CAPES, Cnpq, FAPEMIG. E um agradecer Hella Alicia Ortiz Bachen da UNILA pela tradução da parte do resumo em espanhol.

Referências

Averner, M. M. & MacElroy, R. D. (1976) *On the habitability of Mars: an approach to planetary ecosynthesis*. NASA SP-414.

Balkwill, D. L., Maratea, D., & Blakemore, R. P. (1980). Ultrastructure of a magnetotactic spirillum. *Journal of Bacteriology*, 141(3), 1399-1408.

Bazyliniski, D.A., Garrat-Reed, A. J. & Frankel, R. B. (1994). Electron microscopic studies of magnetosomes in magnetotactic bacteria. *Microsc. Res. Tech.* v. 27, p. 389-401. doi:10.1002/jemt.1070270505

Bazyliniski, D. A., & Frankel, R. B. (2004). Magnetosome formation in prokaryotes. *Nature Reviews Microbiology*, 2(3), 217. doi: 10.1038/nrmicro842

Blakemore, R. (1975). Magnetotactic bacteria. *Science*, 190(4212), 377-379. doi: 10.1126/science.170679

Blakemore, R. P., & Frankel, R. B. (1981). Magnetic navigation in bacteria. *Scientific American*, 245(6), 58-65.

Blakemore, R. P. (1982). Magnetotactic bacteria. *Annual Reviews in Microbiology*, 36(1), 217-238. doi: 10.1146/annurev.mi.36.100182.001245

Bellini, S. (2009) Further studies on “magnetosensitive bacteria”. *Chin. J. Ocean. Limnol.* 27: 6. doi:10.1007/s00343-009-0006-2

Fassbinder, J. W., Stanjekt, H. & Vali, H. (1990). Occurrence of magnetic bacteria in soil. *Nature*, 343(6254), 161. doi:10.1038/343161a0

Fogg, M. J. (1989) The Creation of an artificial, dense Martian atmosphere: a major obstacle to the terraforming of Mars. *JBIS* 42, 577–582. Retrived from: <http://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1989JBIS...42..577F>

Fogg, M. J. (1993) Terraforming: a review for environmentalists. *The Environmentalist*, 13, 7–17. doi:10.1007/BF01905499

Fogg, M. J. (1995) *Terraforming: Engineering Planetary Environments*. SAE International Publisher, Warrendale, PA.

Fogg, M. J. (1998) Terraforming Mars: a review of current research. *Adv. Space Res.* 3, 415–442. doi:10.1016/S0273-1177(98)00166-5

Frankel, R. B. (1984). Magnetic guidance of organisms. *Annual review of biophysics and bioengineering*, 13(1), 85-103. doi:10.1146/annurev.bb.13.060184.000505

Frankel, R. B., Bazylinski, D. A., Johnson, M. S., & Taylor, B. L. (1997). Magneto-aerotaxis in marine coccoid bacteria. *Biophysical Journal*, 73(2), 994-1000. doi:10.1016/S0006-3495(97)78132-3

Frankel R.B., Williams T.J., Bazylinski D.A. (2006) Magneto-Aerotaxis. In: Schüler D. (eds) *Magnetoreception and Magnetosomes in Bacteria*. Microbiology Monographs, 3. Springer, Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/7171_2006_036

Gorby, Y. A., Beveridge, T. J., & Blakemore, R. P. (1988). Characterization of the bacterial magnetosome membrane. *Journal of Bacteriology*, 170(2), 834-841. doi:10.1128/jb.170.2.834-841.1988

Hartmann, W. K., Kallenbach, R., Geiss, J., & Turner, G. (2001). Summary: New views and new directions in Mars research. In *Chronology and Evolution of Mars* (461-470). Springer, Dordrecht. doi: 10.1023/A:1011926129279

Kirschvink, J. L., Jones, D. S., & MacFadden, B. J. (Eds.). (2013). *Magnetite biomineralization and magnetoreception in organisms: a new biomagnetism*, 5. Springer Science & Business Media. doi: 10.1007/978-1-4613-0313-8

Lefèvre, C. T., & Bazylinski, D. A. (2013). Ecology, diversity, and evolution of magnetotactic bacteria. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 77(3), 497-526. Doi: 10.1128/MMBR.00021-13

Lins de Barros, H.G.P., Esquivel, D.M. & Farina, M. (1990). Magnetotaxis. *Sci. Prog. Oxford*. 74, 347-359. Retrieved from: <https://www.jstor.org/stable/43423895>

Mann, S., Sparks, N. H., & Board, R. G. (1990). Magnetotactic bacteria: microbiology, biomineralization, palaeomagnetism and biotechnology. *Adv. Microb. Physiol*, 31, 125-181. doi:10.1016/S0065-2911(08)60121-6

Margato, B., Santos, M. D., & Barros, H. L. D. (2007). Magnetic properties of magnetotactic microorganism: an example of multidisciplinary research. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29(3), 347-353. Retrieved from: <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v29n3/a06v29n3.pdf>

Martins, J. L. (2007). Ecologia dos organismos multicelulares magnetotáticos. Tese de Doutorado em Ciências (Microbiologia). Instituto de Microbiologia Prof. Paulo Góes, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

McKay, D. S., Gibson, E. K., Thomas-Keprta, K. L., Vali, H., Romanek, C. S., Clemett, S. J., & Zare, R. N. (1996). Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001. *Science*, 273(5277), 924-930. doi: 10.1126/science.273.5277.924

McKay, C. P. & Marinova, M. M. (2001) The Physics, Biology and Environmental Ethics of making Mars habitable. *Astrobiology*, 1, 89–109. doi:10.1089/153110701750137477

Owen, T., Biemann, K., Rushneck, D. R., Biller, J. E., Howarth, D. W., & Lafleur, A.L. The composition of atmosphere at the surface of Mars. *Journal of Geophysical Research*, v.82, n.28, p.4635-4639, 1977; doi:10.1029/JS082i028p04635

Pereira, A.S. et al. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [e-book]. Santa Maria. Ed. UAB/NTE/UFSM. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1. Acesso em: 25 out. 2019.

Sagan, C. (1973) Planetary engineering on Mars. *Icarus*, 20, 513–514. doi:10.1016/0019-1035(73)90026-2

Stolz, J. F. (1993). Magnetosomes. *Microbiology*, 139(8), 1663-1670. doi:10.1099/00221287-139-8-1663

Sukumaran, P. V. (2005). Magnetotactic bacteria, magnetofossils and the antiquity of life. *Current Science*, 88(6), 879-885. Retrieved from: <https://www.jstor.org/stable/24110366>

Thomas-Keprta, K. L., Clemett, S. J., Bazylnski, D. A., Kirschvink, J. L., McKay, D. S., Wentworth, S. J., & Romanek, C. S. (2002). Magnetofossils from ancient Mars: a robust biosignature in the Martian meteorite ALH84001. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(8), 3663-3672. doi:10.1128/AEM.68.8.3663-3672.2002

Williams, T. J., Zhang, C. L., Scott, J. H., & Bazylnski, D. A. (2006) Evidence for autotrophy via the reverse tricarboxylic acid cycle in the marine magnetotactic coccus strain MC-1. *Appl. Environ. Microbiol.* 72, 1322–1329. doi:10.1128/AEM.72.2.1322-1329.2006

Zubrin, R. M. & McKay, C. P. (1997) Technological requirements for terraforming Mars. *JBIS*, 50, 83–92. doi:10.2514/6.1993-2005

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Bruno Leonardo do Nascimento-Dias – 100%