

ISSN 0029-3865

CBPF-NF-058/83
MAGNETOTAXIA EM MICROORGANISMOS DA
REGIÃO DO RIO DE JANEIRO: UMA VISÃO GERAL
by

H.G.P. Lins de Barros e D.M.S. Esquivel

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF/CNPq
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150
22290 - Rio de Janeiro, RJ - Brasil

RESUMO

Apresentamos algumas características de diversos micro organismos magnetotacticos encontrados em sedimentos coletados na região do Rio de Janeiro. O estudo de características magné ticas destes microorganismos indicam algumas propriedades ge - rais do fenômeno de magnetotaxia.

Key-words: Magnetotaxia; Magnetismo; Comportamento de seres vi vos.

1. INTRODUÇÃO

Por que geralmente não encontramos um imã, um par de bobinas ou uma bússola em um laboratório de um Instituto de Ciências Biológicas? Bem ou mal o campo magnético terrestre possui propriedades importantes que são estudadas nos Institutos de Geociências e a vida, desde o seu início sobre a Terra, ocorreu, e está se desenvolvendo, na sua presença. Fraco, se comparado a campos magnéticos obtidos em laboratório, porém permanente, o campo geomagnético deixa sua história contada em sedimentos, rochas vulcânicas, cerâmicas e altera características importantes da biosfera.

Em trabalho recente (*) comentamos sobre uma possível interpretação para o fato do campo magnético ter sido deixado de lado no estudo sistemático de sistemas vivos, feitos, pela ciência ocidental, à partir do século XVIII. Mostramos que durante muitos séculos a influência de "forças magnéticas" sobre o comportamento do Homem era considerada e que, após a racionalização do conceito de campo, feita em fins do século XVIII, o magnetismo não teve um lugar de destaque no estudo de seres vivos. Só recentemente, através das observações de vôos de pombos, que as hipóteses de influências do campo geomagnético sobre o ser vivo voltou a ser considerada, agora dentro dos quadros da ciência ocidental. A descoberta de bac-

(*) Para uma discussão sobre a evolução do conceito de magnetismo escrevemos um artigo, publicado em Ciência e Sociedade intitulado "Magnetismo em seres vivos. Por que não?" (CBPF-CS-002/83). Na realidade a idéia original era de se fazer um único artigo, tendo uma introdução histórica bastante longa e esta continuação que ora apresentamos. Razões pessoais fizeram com que divulgássemos logo a primeira parte.

térias que se orientam de acordo com as linhas de campo magnético, realizada em 1974, constitui a primeira evidência de que este campo pode afetar o comportamento dos seres vivos. Esta evidência veio reforçar as hipóteses levantadas em estudos de comportamentos em pombos, abelhas... desenvolvidos nos últimos 30 anos, de que o campo magnético terrestre é um elemento importante que deve ser levado em consideração para se compreender a adaptabilidade dos organismos ao seu ambiente natural.

Neste trabalho apresentamos, na seção II, algumas propriedades do campo geomagnético, enfatizando os momentos históricos que marcaram a compreensão do campo vetorial magnético. Na seção III apresentamos as técnicas e os resultados dos estudos de microorganismos magnetotáticos realizados em sedimentos coletados na região da cidade do Rio de Janeiro (RJ - Brasil). Finalmente, na seção IV, discutimos algumas idéias gerais sobre a resposta de microorganismos ao estímulo magnético (magnetotaxia) baseado nos dados apresentados anteriormente.

2 CAMPO GEOMAGNETICO

O campo magnético é um campo vetorial caracterizado por três componentes. Normalmente utiliza-se, nos trabalhos de geomagnetismo, a declinação, a inclinação e a amplitude para descrever o vetor campo magnético terrestre. Estas componentes estão relacionadas com um sistema ortogonal de referência cujos eixos são definidos em função das características geográficas do ponto considerado na superfície da Terra. Um dos eixos coincide com o meridiano que passa pelo ponto e tem o sentido norte geográfico. O outro eixo é perpendicular ao plano horizontal tangente à superfície da Terra e com o sentido do centro da Terra e o terceiro eixo é perpendicular aos dois anteriores e com o sentido oeste. A declinação magnética é definida como sendo o ângulo que a projeção do campo geomagnético no plano tangente à superfície da Terra faz com o meridiano. A inclinação magnética é o ângulo que o campo forma com o plano horizontal tangente à superfície. A amplitude ou intensidade é o módulo do vetor campo geomagnético.

O uso da bússola como instrumento de orientação e navegação marítima iniciou-se, no Ocidente, por volta de 1300 e a observação de que a agulha aponta para uma direção próxima a do Norte-Sul geográfico levou à necessidade de se definir a declinação magnética e mapeá-la. A conduta empirista adotada por Gilbert em seu trabalho sobre magnetismo e geomagnetismo possibilitou a primeira medida de inclinação magnética. Somente após a racionalização do conceito de campo magnético, realizada principalmente por Faraday, é que foi possível

vel se realizar a primeira medida de amplitude do campo geomagnético, feita por Gauss em 1832. São três momentos distintos da história conceitual do magnetismo, cada um dando uma contribuição para o conhecimento de uma das componentes do campo.

O estudo detalhado do campo produzido por esferas magnetizadas (terrelas), realizado por Gilbert, mostrou que a Terra se comporta como um dipolo magnético. As causas deste campo, entretanto, continuam desconhecidas até hoje. Análise feita através da expansão em serie de funções harmônicas esféricas mostra que a principal fonte do campo terrestre na superfície tem origem no seu interior. As contribuições da atmosfera são pequenas e dão conta de variações diurnas e outros efeitos. Atualmente o modelo mais aceito para a fonte de campo magnético terrestre é o de um dínamo^[1] ("self-exciting hydromagnetic dynamo") no interior da Terra produzindo uma corrente elétrica que induz um campo magnético. Este modelo explica algumas características fundamentais do magnetismo terrestre sem contudo, fornecer explicações razoáveis para fenômenos importantes como as diversas reversões do campo geomagnético que ocorreram durante os últimos bilhões de anos^[2]. Além disso, não é capaz de descrever satisfatoriamente regiões em que o campo terrestre se afasta bastante do campo produzido por um dipolo, regiões conhecidas como anomalias magnéticas^[3]. Uma destas regiões, a de maior extensão, está situada próxima ao Rio de Janeiro, Brasil, e é conhecida como Anomalia Magnética do Atlântico Sul. Toda a região sul-este do Brasil possui campos muito baixos comparados com os de outros pontos da Terra.

O Brasil, devido a sua extensão territorial, é um país que apresenta características particulares de campo para estudos de magnetismo em seres vivos. A região norte do país

possui um campo com inclinação positiva. Próximo a cidade de Fortaleza, Ceará, passa o equador magnético, onde o campo tem inclinação nula. Na região de Anomalia Magnética do Atlântico Sul os campos são inferiores a 0.25G e inclinações de -25° . Em toda a extensão do Brasil a magnitude do campo tem valores compreendidos entre 0.24G a 0.32G [4] (Fig. 1).

3 RESULTADOS

3.1 Introdução

Nesta seção apresentamos a descrição de métodos e técnicas de preparo de amostras para observação em microscopia ótica e eletrônica de microorganismos magnetotáticos encontrados em águas da região da cidade do Rio de Janeiro. Apresentamos também os principais resultados obtidos destas análises sobre as características destes microorganismos, bem como tamanho, número e forma de cristais observados em microscopia eletrônica, responsáveis por estas propriedades magnéticas. A observação frequente e sistemática de águas desta região tem mostrado um número grande de diferentes tipos morfológicos de organismos tipo Sul, muitos dos quais ainda não identificados.

Na Lagoa Rodrigo de Freitas encontrou-se, em amostras ricas de microorganismos magnetotáticos de cerca de $6\mu\text{m}$ de diâmetro, algumas células apresentando comportamento e características que sugeriam ser de algas verdes do gênero Chlamydomonas, constituindo a primeira evidência de resposta magnetotática em um organismo eucarioto [5].

3.2 Técnicas

Amostras de águas contendo sedimentos foram obtidas

em diversos pontos do Rio de Janeiro. Apresentaremos resultados de águas salobras da lagoa Rodrigo de Freitas, de águas salgadas do fundo da Baía de Guanabara e de água doce de um pequeno rio localizado ao sul da cidade.

Todas as coletas foram feitas em locais com profundidades variando entre 20 e 60 cm e apresentando lento movimento das águas. Mantidas em laboratório, à temperatura ambiente e sem enriquecimento químico, as amostras apresentaram após um ou dois dias, um crescimento do número de microorganismos magnetotáticos, chegando a concentrações de 10000 células/cm³. Tentativas de obtenção de culturas destes microorganismos foram realizadas a partir de alguns meios conhecidos, em particular, daquele utilizado para o *Aquaspirillum Magnetotacticum* [6,7], sem resultados positivos.

A preparação de amostras inicia-se com a concentração magnética dos microorganismos magnetotáticos vivos através de ímãs, ou bobinas de Helmholtz adaptadas na base do microscópio óptico [27]. Concentrações bastante altas foram obtidas utilizando-se a ação do campo magnético em amostras mantidas em tubos de vidro de cerca de 30 cm de comprimento por 0,5 cm de diâmetro. Neste caso, após alguns minutos, podemos coletar com o auxílio de pipetas Pasteur amostras limpas de sedimentos e ricas de microorganismos magnetotáticos.

O material utilizado para microscopia eletrônica de transmissão (TEM) foi fixado em vapor de tetróxido de Osmio a 1% observado sobre uma grade revestida por filme de colódio (0,4% de acetato de amila).

As preparações para microscopia eletrônica de varre-

dura foram feitas sobre lamínulas de vidro com Poli-L-Lysina fixando-se o material concentrado magneticamente em glutaraldeido 2,5% em tampão fosfato 0,1M por mais de uma hora. A seguir lavou-se diversas vezes com tampão fosfato e ácido osmótico a 1% e secando com a técnica de ponto de crítico de CO₂. Após o "sputtering" com Au ($\approx 200 \text{ \AA}$) observamos as lamínulas num microscópio ótico. Este procedimento permitiu observar os mesmos microorganismos oticamente e em varredura (SEM).

Para obtenção de cortes ultrafinos, após a concentração magnética dos microorganismos, que foram fixados em glutaraldeido seguiu-se centrifugação (10000 rpm por 15 min) e desidratação utilizando-se acetona em concentrações crescentes. O pellet foi processado de forma convencional, colocado em acetona-EPON em concentrações iguais durante 12 horas e incluído em EPON. Após a polimerização foram feitos os cortes ultrafinos em torno de 1000 \AA de espessura.

A observação ótica e filmagem destes organismos foi realizada em um microscópio Leitz-Ortholux com iluminação de fundo claro e objetivas variando de 10 a 100 x e oculares variando de 10 a 40 aumentos.

A análise de movimento, determinação de velocidade, tempo e raio da volta em U foram feitos por processo cinematográfico e video acoplado-se o sistema ao microscópio ótico. Medidas feitas por este procedimento possibilitaram obter a velocidade média de migração em função do campo magnético externo, além de se obter outros parâmetros importantes.

A determinação do momento magnético de microorganismos magnetotáticos coletados em ambiente natural consti-

tui um problema de difícil solução, devido ao pequeno número de microorganismos por amostra. Em culturas de *Aquaspirillum Magnetotactium* obtidas por R.P. Blakemore, Rosenblat e colaboradores obtiveram medidas do momento magnético de bactérias usando técnicas de birrefringência, [8,9,10]. Estas técnicas, entretanto, só são possíveis com amostras obtidas de culturas.

A microscopia eletrônica, quando possível, fornece imagens de uma cadeia de regiões densas identificadas, através de técnicas espectroscópicas, com cristais de magnetita [11]. O momento magnético de bactérias pode ser estimado através do número e volume destes cristais, desde que a cadeia seja bastante linear [12].

$m = \text{volume de todos os cristais} \times$

Magnetização por unidade de volume (480 erg/G.cm³)

Quando se está trabalhando com organismos de alguns microns não se consegue obter imagem de microscopia eletrônica de transmissão com boa resolução interna e esta estimativa fica prejudicada.

Outro método possível de medida do momento magnético total é aquele feito através da resposta do organismo à inversão do campo magnético, desenvolvida por C. Bean e conhecida como volta em U [13-15]. Sob a ação de um campo magnético constante, microorganismos magnetotáticos descrevem, aproximadamente, trajetórias de hélice cilíndrica alinhada à linha de campo. Quanto maior o campo, maior o passo de hélice. Quando o campo é subitamente invertido os microorganismos são submetidos a um torque e o sentido de movimento se inverte segundo uma trajetória em U. O tempo necessário para efetuar esta inversão e o diâmetro L da volta em U dependem do momento magnético total do organismo e são dados por:

$$\tau = \frac{8\pi\eta R^3}{m B_0} \ln \frac{2m B_0}{kT} \quad (1)$$

$$L = \frac{8\pi^2 R^3 v \eta}{m B_0} \quad (2)$$

onde η é a viscosidade do meio ($\eta_{H_2O} = 10^{-2}$ poise), k a constante de Boltzman e T a temperatura.

As eqs. (1) e (2) são obtidas assumindo-se que os organismos são esféricos, de raio R , e se movimentam a uma velocidade v , independente de B_0 , num meio viscoso, homogêneo, e todo desvio da trajetória retilinea é devido ao movimento Browniano, importante em partículas de cerca de $1\mu m$ de raio. No caso de organismo vivo, este modelo não dá conta de uma série de fatores, em particular, características de forma e desvios da trajetória devido aos mecanismos de movimento (flagelos, cílios, etc.) que estão associados a energias internas do ser vivo.

Ainda assim, porém, a medida do momento magnético total através da volta em U é a maneira mais geral de se obter informações sobre características magnéticas destes organismos. Para se evitar contribuições ao movimento, devido a energia biológica, pode-se trabalhar com organismos previamente fixados e desta maneira obter medidas do tempo de rotação devido à inversão do campo externo e usando a eq. (1) obter o momento magnético total.

Todos os microorganismos magnetotacticos encontrados foram expostos a um campo magnético oscilante intenso produzido por um desmagnetizador de toca-fitas comercial. As populações originais, compostas predominantemente de microorganismos tipo Sul, apresentaram-se, após a exposição ao campo

do desmagnetizador, com uma população de cerca de 50% tipo Sul e 50% tipo Norte.

3.3 Análise de resultados

A lagoa Rodrigo de Freitas, localizada numa região costeira metropolitana, é bastante poluída com matéria orgânica, o que torna suas águas um complexo viveiro de microorganismos. Observação, através de um microscópio ótico, de amostras destas águas, mostrou a existência de bactérias magnetotáticas coccus e bastonetes com tamanhos da ordem de 1 a 2 μm e 2 a 3 μm , respectivamente que se comportam da maneira já descrita [16,17,27].

Observamos, também, a existência de bactérias bastonetes que apresentam resposta diferente quanto à mudança do sentido do campo magnético. Quando o campo é invertido, estas bactérias concentradas na borda giram e iniciam um movimento no sentido do centro da gota. Após navegarem cerca de 20 μm elas invertem o sentido do movimento, sem contudo girarem, e voltam para a borda da gota. Estas bactérias apresentam a mesma resposta passiva ao campo magnético [16,17].

Bactérias coccus analisadas em microscopia eletrônica de transmissão mostram a existência de cadeias compostas por regiões de alta densidade com formas geométricas. As fotografias mostram que estas regiões parecem ter a forma de prismas de base hexagonal e, devido à analogia com trabalhos anteriores [10-12,27], podemos caracterizar como compostas de magnetita (Fig. 2). A variação estatística dos volumes destas regiões apresenta as características de uma distribuição estreita cen-

trada em $5 \times 10^{-16} \text{ cm}^3$. O número de regiões/célula é bastante homogêneo em todas as amostras analisadas e situa-se na faixa de 8 a 10 para bactérias coccus.

Em algumas amostras obtivemos grande número de bactérias com cadeias não lineares (em L,S,X..)(Figs. 3,4). Em amostras bastante ricas fixadas em solução de ácido osmico observamos a formação de conjuntos alinhados de bactérias que respondem magneticamente. A microscopia eletrônica de transmissão destes conjuntos apresenta um possível ordenamento das cadeias de cristais (Fig. 11).

Nestas águas observamos também a presença de diversos microorganismos magnetotáticos de coloração esverdeada que apresentam forma aproximadamente esférica e de diâmetro entre 4 e $7 \mu\text{m}$, com resposta similar a das bactérias, porém com diferenças no movimento e comportamento. Em campos da ordem do campo geomagnético praticamente não se percebe a orientação magnética. Para campos superiores a 3G a trajetória destes microorganismos é a de uma hélice cilíndrica alinhada à linha de campo e a velocidade de deslocamento varia entre 30 e $100 \mu\text{m/s}$. Concentrados na extremidade da gota e observados em aumentos superiores a 500x vemos que eles executam um movimento de rotações em torno de si mesmo. Esta rotação cessa quando eles estão nadando no meio da gota ou quando o campo externo é superior a uns 500G. Estas características indicam que a energia de interação magnética, para campos inferiores a 100G, é pequena comparada com a energia utilizada para o movimento, de origem biológica. O movimento destes microorganismos se apresenta bastante mais suave e menos preso às linhas de forças do campo magnético do que o movimento das bactérias magnetotáticas.

Em populações ricas destes microorganismos observou-se por microscopia ótica células que, quando fixadas em ácido osmico a 1% em solução 1% de ácido crômico, apresentam um contorno piriforme para esférico, sem nunca apresentar contorno fusiforme, com cerca de 10 a 12 ondulações leves nas paredes da membrana externa, sem processos de enrugamento. Utilizando-se soluções de iodo foi possível observar uma estrutura em forma de copo, identificada como cloroplasto, numa estrutura de um blefaroplasto central para um flagelo e 4 a 5 pirenoides. As características observadas nesta identificação levaram a sugerir serem estas células algas verdes magnetotáticas do gênero Chlamydomonas [5,17].

As dificuldades que encontramos para o prosseguimento dos estudos destes microorganismos se deram não somente porque as tentativas de culturas foram infrutíferas, mas também porque as técnicas de enriquecimento de amostras naturais não foram ainda dominadas. Em vista destas dificuldades o processo de preparação de amostras para obtenção de microscopia eletrônica tem sido paulatinamente aprimorado para que seja possível amostras limpas de impurezas do meio e com um grande número destes microorganismos.

Um ponto a ser levantado aqui é que baseado na observação ótica frequente e continuada, além de análise estatística de medidas de velocidade e do tempo de volta em U, fomos levados a admitir a existência de mais de um tipo de microorganismos magnetotáticos com estas características. Resultados de microscopia eletrônica de varredura de uma mesma amostra parecem confirmar esta suposição. As Figs. 5 e 6 mostram, respectivamente, a morfologia de 2 destes microorganismos

mos, um apresentando um grande número de microvilosidades e outro constituído por uma estrutura globular disposta em um arranjo helicoidal sobre uma esfera. É possível, entretanto, que estes resultados mostrem um mesmo microorganismo em dois estágios diferentes de desenvolvimento.^[19]

A Fig.7 é uma microscopia eletrônica de transmissão de um destes microorganismos aproximadamente esféricos, circundado por uma grande quantidade de fibras e apresentando em seu interior um número da ordem de 1500 regiões de alta densidade dispostos em pequenos aglomerados, cadeias alinhadas ou formando uma distribuição regular plana. Estas regiões são bem definidas e se apresentam em diversas formas regulares com dimensões variando entre 400 e 800 Å (dentro dos limites de monodomínios magnéticos de magnetita)^[20]. Resultados preliminares de microanálise destas regiões densas indicam a presença de ferro semelhante aos resultados de análises dos magnetossomas de bactérias magnetotáticas^[16,18]. Estas regiões devem conter uma percentagem de magnetita (Fe_3O_4), formando estruturas especializadas que tornam possível a orientação magnética observada.

A Fig. 8 mostra uma microscopia de cortes ultrafinos de um destes microorganismos onde se vê cerca de 10 células arrumadas em espiral e circundadas por uma camada envoltória. Esta camada apresenta uma estrutura periódica radial.

Observamos algumas invaginações nas membranas duplas que envolvem as células e também estruturas especializadas em seu interior, tais como as regiões de alta densidade, estruturas internas, estruturas semelhantes a "membranas polares" e organelas^[21-23]. Detalhe ampliado das regiões de al-

ta densidade mostra uma possível membrana envolvendo-as, além de uma subestrutura, constituída por pequenos grãos de material denso. Estas regiões estão associadas a orientação magnética observada nestes microorganismos e devem ser organelas correspondentes aos magnetossomos encontrados nas bactérias magnetotáticas. Estas características indicam que este microorganismo é uma colônia ou agregado incomum de células, apresentando estruturas internas especializadas [19,22].

O estudo de águas (doce e salgada) coletadas em outros locais mostrou que o fenômeno de magnetotaxia em microorganismos é bastante geral embora as suas respostas apresentem características próprias que dependem do meio em que eles são encontrados.

Amostras de água doce coletadas apresentaram quatro tipos diferentes de microorganismos magnetotáticos convivendo no mesmo micro-habitat. Os principais resultados destas observações estão apresentados na tabela 1. A Fig. 9 mostra uma microscopia eletrônica de transmissão de uma bactéria coletada nestas águas. Observamos a cadeia cristalina no interior da célula além de algumas características particulares. A Fig. 10 mostra uma imagem ótica de alguns microorganismos magnetotáticos encontrados nestas águas.

Em águas salgadas encontramos basicamente três tipos diferentes de microorganismos magnetotáticos: bactérias coccus de cerca de $2\ \mu\text{m}$ de diâmetro, microorganismos aproximadamente esféricos e esverdeadas de cerca de $5\ \mu\text{m}$ de diâmetro e organismos com forma ovoide de cerca de $15\ \mu\text{m}$. Neste último a resposta magnética, apesar de direta e passiva, é bastante mais elaborada do que as descritas anteriormente.

A tabela 1 contém a caracterização de alguns destes microorganismos estudados, seus raios médios obtidos por microscopia eletrônica e/ou ótica, o número médio de regiões densas encontradas nos seus interiores, suas velocidades médias, diâmetros e tempos de reversão para o campo $B = 9.3G$, seus momentos magnéticos calculados através da microscopia eletrônica e/ou do método da volta em U, a razão mB_0/kT e o tempo de reversão calculado para o campo geomagnético local. Para os cálculos de momentos magnéticos através de microscopia eletrônica consideramos como sendo magnetita 80% do volume das regiões densas [18].

4 CONCLUSÕES

A diversidade de tipos de microorganismos magnetotáticos encontrados [12,17,24], bem como a variedade de comportamentos observados por nós em diferentes águas e em locais com diferentes campos magnéticos (Fortaleza [25], Manaus, Salvador, Rio de Janeiro) nos tem levado a pensar no fenômeno de magnetotaxia de uma forma ampla.

Microorganismos magnetotáticos afastados podem ser tratados como dipolos magnéticos que não interagem entre si. O alinhamento médio de dipolos magnéticos m na presença de um campo B_0 é dado por:

$$\langle \cos\theta \rangle = L(mB/kT) \quad (3)$$

onde $L(x) = \coth x + \frac{1}{x}$ é a função de Langevin do paramagnetismo clássico [26]. mB/kT é a razão entre a energia de interação magnética e a energia térmica. Quando $x \ll 1$, $L \rightarrow 0$ e os dipolos se encontram fracamente alinhados com o campo, enquanto que para $x > 10$,

$L \sim 1$ e o alinhamento é praticamente total ($\langle \cos\theta \rangle \sim 1$).

Podemos ainda considerar que eles se deslocam no meio com uma velocidade v_0 . A velocidade média de migração na direção da linha de campo é dada por:

$$\langle v \rangle = v_0 \langle \cos\theta \rangle \quad (4)$$

com $\langle \cos\theta \rangle$ dado pela eq.(3).

Quando a razão mB/kT é da ordem de 1 a velocidade média de migração é de cerca de 30% da velocidade instantânea o que significa que, ainda neste caso, há vantagem biológica. Assim, no Rio de Janeiro ($B_0 = 0.25G$, inclinação $I \approx 25^\circ$) um microorganismo com $m_M B_0/kT = 1$ (ou seja, $m_M = 1.6 \times 10^{-13}$ e.m.u.) temos $\langle v \rangle = 0.3 v_0$ e a componente vertical da velocidade de migração, que fornece a velocidade com que os microorganismos nadam para o fundo, é:

$$\langle v \rangle_V = \langle v \rangle \sin I \sim 0.1 v_0$$

As estimativas de m apresentadas na tabela 1 mostram que para todos os microorganismos observados $mB_0/kT > 1$. Estes dados indicam que magnetotaxia pode ser um mecanismo mais eficiente que a quimotaxis para produzir um deslocamento na direção do fundo.

A existência de um momento magnético no interior destes microorganismos faz com que haja um campo magnético ao seu redor, que diminui com o aumento da distância. O campo a um raio de distância da superfície destes microorganismos deve atingir, em alguns casos, valores superiores ao do campo local indicando que em microorganismos suficientemente próximos esta interação pode ser mais importante que a interação com o campo geomagnético. A fig.11 parece indicar a existência de interação magnética entre bactérias coccus quando fixadas na ausência de campo magnético externo inten-

so, numa configuração semelhante a obtida com cristais de magnetita extraídos de cultura de bactérias de A. Spirillum (fig. 12). Esta interação magnética deve ficar mascarada quando observamos microorganismos vivos já que a energia do movimento, proveniente de fontes biológicas, é muito maior do que a devida à interação.

Uma outra observação que fizemos é com respeito a diferenciação de forma e número de cristais de magnetita encontrados em bactérias do mesmo tipo, coletadas em locais onde os campos geomagnéticos tem valores diferentes. Tudo parece indicar que estas variações locais de campo geomagnético levariam a um momento magnético tal que o produto do momento magnético pelo campo geomagnético local seja aproximadamente constante.

Para os microorganismos apresentados nas fotos 4 a 7 a existência de cerca de 1500 regiões de alta densidade não alinhados parece levar a uma nova visão do fenômeno da magnetotaxia. Embora estes microorganismos tenham da ordem de 100 vezes mais regiões densas que as bactérias o seu momento magnético é somente de uma ordem de grandeza maior. Uma análise mais apurada mostra um certo ordenamento nos diferentes agrupamentos em que estas regiões densas se dividem. Esta distribuição pode indicar um outro tipo de sensibilidade ao campo magnético, produzida por uma distribuição espacial de dipolos magnéticos, capaz de detetar variações espaciais do campo.

Por outro lado, o microorganismo que utiliza o campo geomagnético como forma de orientação magnética deve ter uma resposta eficiente a alterações deste campo ou de sua posição neste campo.

Assim, se houver no meio perturbações que façam com que o organismo se desvie de sua trajetória, a correção deste desvio deveria ser feita em um intervalo de tempo inferior ao intervalo que ocorre entre duas perturbações consecutivas do meio. Isto quer dizer que o tempo de reversão deve ser eficiente do ponto de vista biológico, ou seja, do ponto de vista do tempo de vida e do tamanho do microorganismo.

Sabemos que para garantir uma orientação magnética é necessário que a energia de interação magnética seja maior que a energia de desordem térmica $\frac{mB}{kT} > 1$, o que ocorre para momentos magnéticos da ordem de $m_M = 1.6 \times 10^{-13}$ e.m.u. no campo geomagnético local ($B_0 = 0.25G$). O tempo de reversão τ cresce com o cubo do raio do microorganismo para um valor de m fixo (eq. 1). Em organismos maiores o crescimento rápido de τ , mantido m_M , tornaria pouco eficiente a resposta ao estímulo magnético. A curva a da figura 13 mostra estes valores de τ calculados para m_M e $B_0 = 0.25G$. A análise de dados da tabela 1 mostra que m cresce com o volume dos microorganismos, levando ao decréscimo de τ . A figura 13 apresenta também os valores de τ para estes valores de m com $B_0 = 0.25G$. Com base nestes resultados devemos esperar que haja um limite superior de tamanhos de organismos a partir do qual magnetotaxia deixa de ser um mecanismo eficiente de orientação.

Em resumo, magnetotaxia parece ser um mecanismo de orientação que é efetivo quando a energia de interação magnética é bastante superior à energia térmica e, ao mesmo tempo, o torque produzido pelo campo geomagnético reorienta o microorganismo num intervalo de tempo muito curto comparado com os ciclos de perturbações que possam ocorrer no meio em que ele vive.

Agradecimentos

Agradecemos ao Prof. Jacques Danon pelas discussões e participação nesta pesquisa. Agradecemos também ao Dr. R.B. Frankel, do Francis Bitter Magnet Laboratory, M.I.T., que nos apresentou o assunto e pela troca contínua de informações. Ao Dr. R.P. Blakemore, da Univ. New Hampshire, que nos cedeu algum material e pelas trocas de informações. A estes três gostaríamos de agradecer o encorajamento, inspiração e idéias. Ao Dr. L.P.H. de Oliveira, in Memoriam, pela atenção especial e pelo bonito exemplo de vida. A Marcos Farina, um amigo e colega, e um bom músico, responsável pelo trabalho criterioso de microscopia eletrônica. Ao Dr. W. de Souza e Dr. R. Machado, por discussões importantes. A Roberto Eisenberg, nosso estudante de iniciação científica, que dedicou várias horas no trabalho. A Marlene B. Mello, por ter datilografado paciente-mente nossos péssimos manuscritos.

REFERÊNCIAS

1. C.R. Carrigan e D. Gubbins - 1979. Sci. Am. Feb. 92.
2. N.D. Opdyke. 1972. Rev. Geophys. and Space Phys. 10,213
3. E.J. Chernosky and E. Maple. 1961. Geomagnetism in "Handbook of Geophysics". U.S. Air Force. McMillan Co. chap. 10.
4. R.C. Godoy. 1981. Variação Secular da Intensidade de Campo Geomagnético no Brasil. Tese de Mestrado. Inst. Geociências. UFRJ.
5. H.G.P. Lins de Barros, D.M.S. Esquivel, J. Danon e L.P.H. de Oliveira. 1982. An. Acad. Bras. Cienc. 54, 258.
6. R.P. Blakemore, D. Maratea e R.S. Wolfe. 1979. Journ.Bacteriol. 140(2) 720.
7. J.C. Escalante-Semenera, R.P. Blakemore e R.S. Wolfe. 1980. Appl. Env. Microb. 40(2), 429.
8. C. Rosenblat, F.F. Torres de Araujo e R.B. Frankel. 1982. J. Appl. Phys. 53, 2727.
9. C. Rosenblat, F.F. Torres de Araujo e R.B. Frankel. 1982. Biophys. J. 40, 83.
10. R.B. Frankel. 1982. Comments on Mol. Cell. Biophys. 1, 293.
11. R.B. Frankel, R.P. Blakemore e R.S. Wolfe. 1979. Science,203, 1355.
12. R.P. Blakemore, 1982. Ann. Rev. Microbiol. 36, 217.
13. C. Bean. Comunicação privada.
14. Ad. J. Kalmijn e R.P. Blakemore. 1978. "The magnetic behavior of mud bacteria" in "Animal Migration, Navigation and Homming". K. Schmidt-Koenig and W.T. Keaton. Eds. Springer-Verlag, N.Y. 354.
15. R.B. Frankel e R.P. Blakemore, 1980. Journ. Mag. Mat. 15-18, 1562.
16. R.P. Blakemore. 1975. Science, 190, 377.

17. D.M.S. Esquível, H.G.P. Lins de Barros, M. Farina, P.H.A. Aragão e J. Danon, 1983. Biol. Cel. 42(2), 227.
18. K.M. Towe and T.T. Moench. 1981. Earth Plan. Sc. Let. 52,213.
19. M. Farina, H.G.P.Lins de Barros, D.M.S. Esquível e J. Danon. 1983. Biol. Cel. 48(1), em publicação.
20. R.F. Butler e S.K. Banerjee. 1975. J. Geophys. Res. 80, 4049.
21. D.L. Balkwill, D. Maratea e R.P. Blakemore. 1980. Journal of Bacteriol. 141(3), 1399.
22. C.C. Remsen. 1983. Int. Rev. Cytolo. 76, 195.
23. C.C. Remsen, S.W. Watson, J.B. Waterbury e H.G. Trüper. 1968. J. Bacteriol. (95),6, 2374.
24. T.T. Moench e W.A. Konetzka.1978. Arch. Microbiol. 119, 203.
25. R.B. Frankel, R.P. Blakemore, F.F. Torres de Araujo,D.M.S. Esquível e J. Danon. 1981. Science, 212, 1269.
26. C. Kittel. 1968. Introduction to Solid State Physics. 3th ed. John Wiley, N.Y.
27. R.P. Blakemore e R.B. Frankel. 1981. Scient. Am. 246(6), 42.

LEGENDAS

- Fig. 1 - Intensidade total do campo geomagnético no Brasil, em Gauss⁽¹⁾.
- Fig. 2 - Detalhe de uma bactéria coccus magnetotactica coletada em sedimentos da Lagoa Rodrigo de Freitas (R.J., Brasil). As regiões de alta densidade apresentam a forma de prismas hexagonais distribuídos em uma cadeia. As flechas indicam pequenas regiões localizadas no fim da cadeia. Barra = $0.5\mu\text{m}$.
- Fig. 3 - Microscopia eletrônica de transmissão de uma bactéria coccus coletada em sedimentos da Lagoa Rodrigo de Freitas (R.J., Brasil) mostrando uma cadeia linear de regiões de alta densidade no interior do citoplasma. Barra = $1\mu\text{m}$.
- Fig. 4 - Microscopia eletrônica de transmissão mostrando outros tipos de cadeias de regiões de alta densidade encontrados em bactérias coccus magnetotacticas (Lagoa Rodrigo de Freitas, R.J., Brasil). Barra = $1\mu\text{m}$. (a) cadeia em L; (b) cadeia em S.
- Fig. 5 - Microscopia eletrônica de varredura de um microorganismo magnetotactico encontrado na Lagoa Rodrigo de Freitas (nº 5 da tabela 1), apresentando uma estrutura globular disposta em um arranjo helicoidal. Barra = $5\mu\text{m}$.
- Fig. 6 - Microscopia eletrônica de varredura de um microorganismo magnetotactico encontrado na mesma amostra da figura anterior. Observamos um grande número de filamentos em torno da superfície do microorganismo. Barra = $5\mu\text{m}$.

- Fig. 7 - Microscopia eletrônica de transmissão de um microorganismo magnetotactico fixado em vapor de osmium. (Ver tabela 1, nº 5).
- (a) Grande número de fibras na superfície exterior. Barra = $5\ \mu\text{m}$.
- (b) Grãos de alta densidade contendo ferro. Barra = $1\ \mu\text{m}$.
- Fig. 8 - Corte ultrafino de microorganismo magnetotactico (nº 5 da tabela 1) com regiões de alta densidade contendo ferro. O aspecto desta imagem sugere que estes microorganismos são de algum tipo pouco usual de colonias ou agregados de células.
- (a) h.d. - regiões de alta densidade contendo ferro.
- c - camada exterior exibindo um arranjo radial.
- i - invaginações
- dm- membrana dupla
- Barra = $5\ \mu\text{m}$.
- (b) dm - membrana dupla
- pm - membrana polar
- m - possível membrana em torno das regiões densas.
- Barra = $0.1\ \mu\text{m}$.
- (c) Detalhe dos grãos densos, mostrando uma possível sub-estrutura. Barra = $0,1\ \mu\text{m}$.
- (d) i.s. Estrutura interna encontrada em algumas células. Barra = $1\ \mu\text{m}$.
- (e) c - Camada exterior exibindo um arranjo radial. Barra = $1\ \mu\text{m}$.
- Fig. 9 - Microscopia eletrônica de transmissão de uma bactéria magnetotactica encontrada em sedimentos de água doce, mostrando duas cadeias paralelas de regiões densas. Barra = $1\ \mu\text{m}$.

- Fig. 10 - Microscopia ótica de uma amostra de água doce com três tipos diferentes de microorganismos magnetotacticos. Barra = $10 \mu\text{m}$.
Flechas mostram:
(1) nº 1, (2) nº 2 e (3) nº 3 da tabela 1.
- Fig. 11 - Treze bactérias coccus magnetotacticas agrupadas em uma distribuição semelhante à da fig. 12. Estas bactérias foram coletadas na Lagoa Rodrigo de Freitas e fixadas na ausência de um campo magnético forte. Barra = $1 \mu\text{m}$.
- Fig. 12 - Cristais obtidos de uma amostra de cultura de A. Magnetotacticum obtida por R.P. Blakemore. A distribuição destes cristais é devido à interação magnética entre eles. Barra = $0,1 \mu\text{m}$.
- Fig. 13 - Relação entre tempo de reversão (τ) no campo geomagnético local ($B_0 = 0.25\text{G}$) e volume de alguns microorganismos magnetotacticos. Curva a: $m = 1.6 \times 10^{-13}$ e.m.u.
 ■ Tempo médio de reversão obtido com os valores estimados de m apresentados na tabela 1.
 // Região esperada para o tempo de reversão (τ).

- TABELA 1 - Algumas características dos microorganismos magnéticos descritos neste trabalho. Apresentamos o local onde os sedimentos foram coletados e uma imagem obtida por microscopia ótica.
- R - raio médio obtido em microscopia ótica e/ou eletrônica.
- N - número médio de regiões de alta densidade encontrados no interior do microorganismo.
- v - velocidade média em $B = 9.3G$. ($\mu\text{m/s}$).
- L - diâmetro médio da volta em U em $B=9.3G$. (μm)
- τ_1 - média dos tempos medidos da volta em U para $B = 9.3G$. (s).
- τ_2 - tempo de reversão calculado pela eq.(1) com $B = 9.3G$. (s).
- m - momento magnético estimado.
- E.M. - por microscopia eletrônica
- U-turn - pelo procedimento da volta em U.
- $m B_0/kT$ - relação entre a energia magnética e térmica no campo geomagnético local ($B_0 = 0.25G$).
- τ_{B_0} - tempo para a volta em U calculado pela eq.(1) com $B = B_0 = 0.25G$.

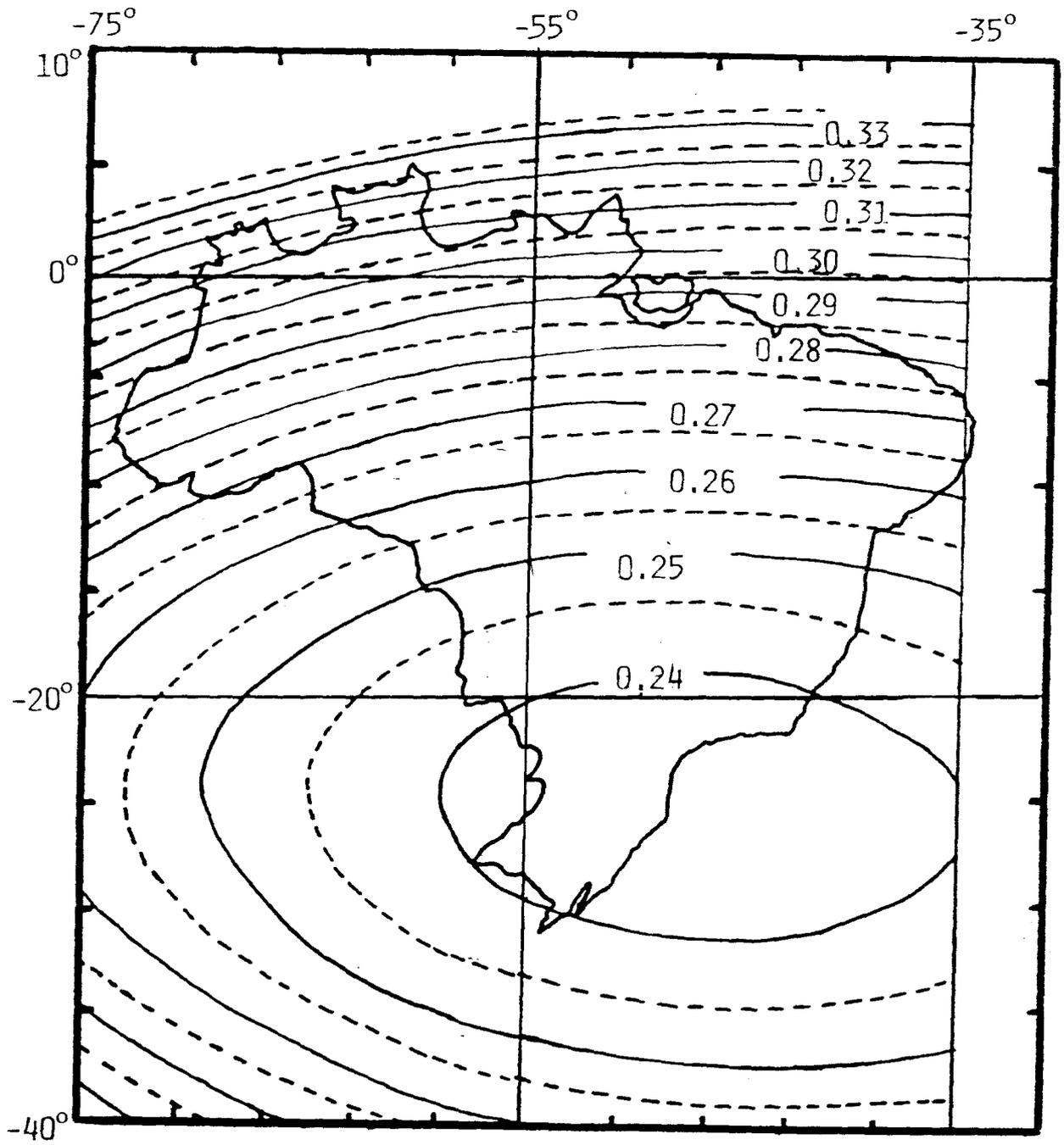


Fig. 1

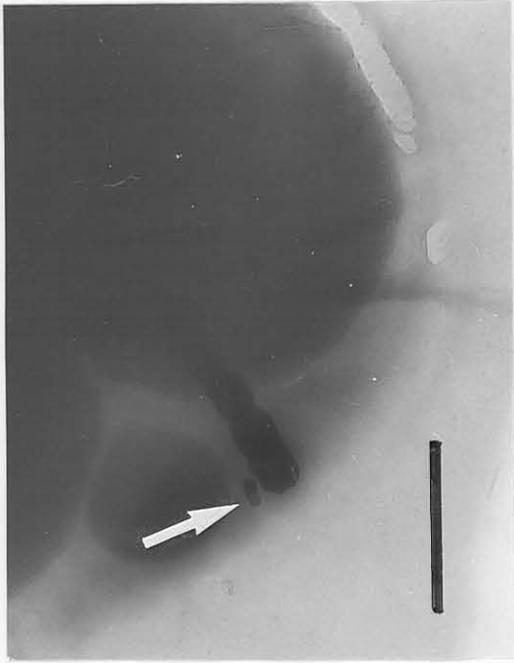


Fig. 2

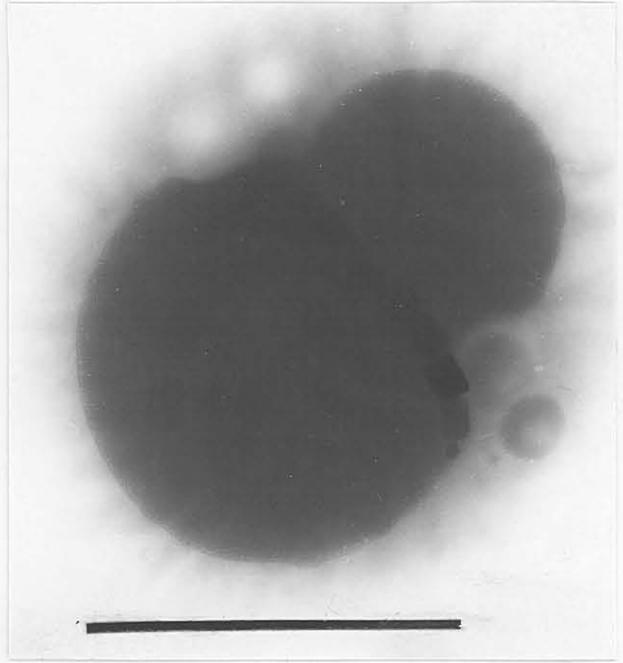


Fig. 3

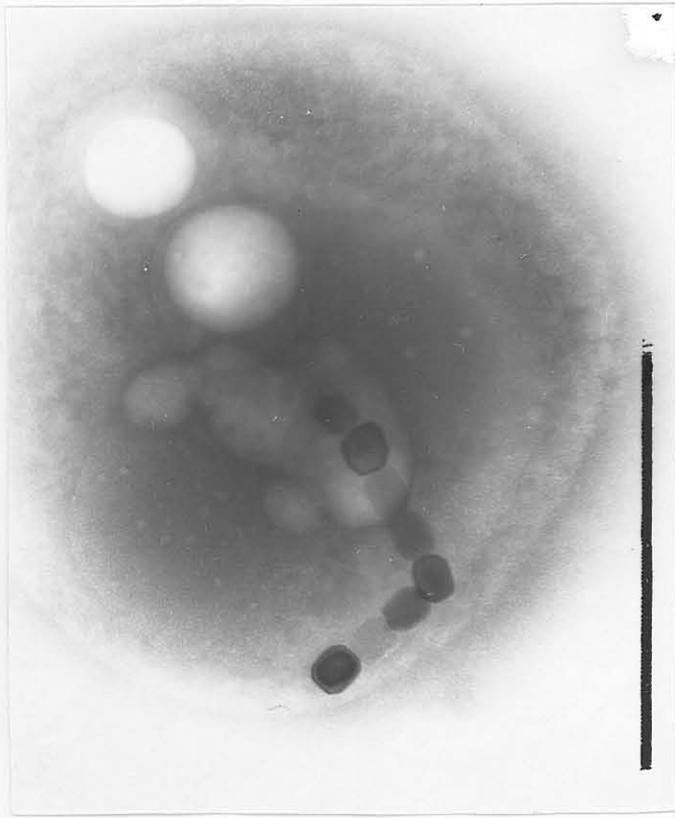


Fig. 4a

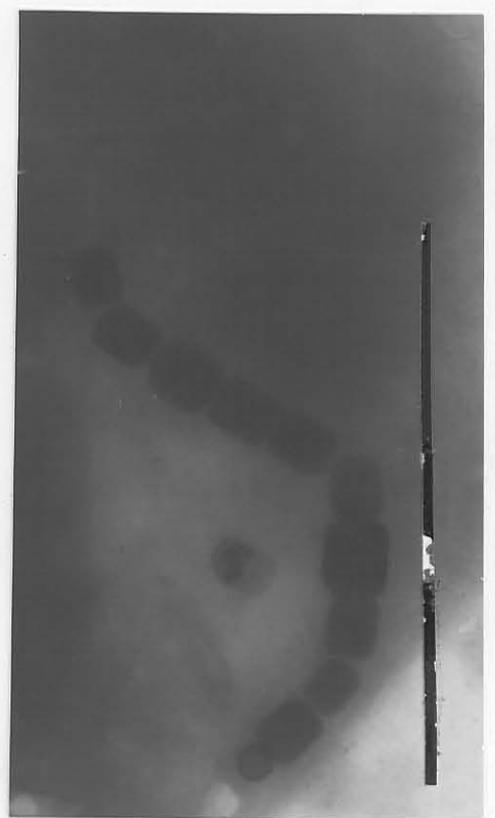


Fig. 4b

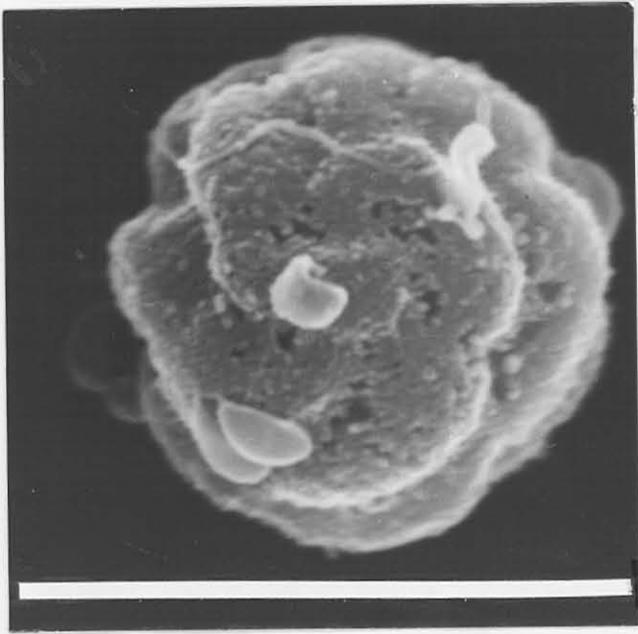


Fig. 5

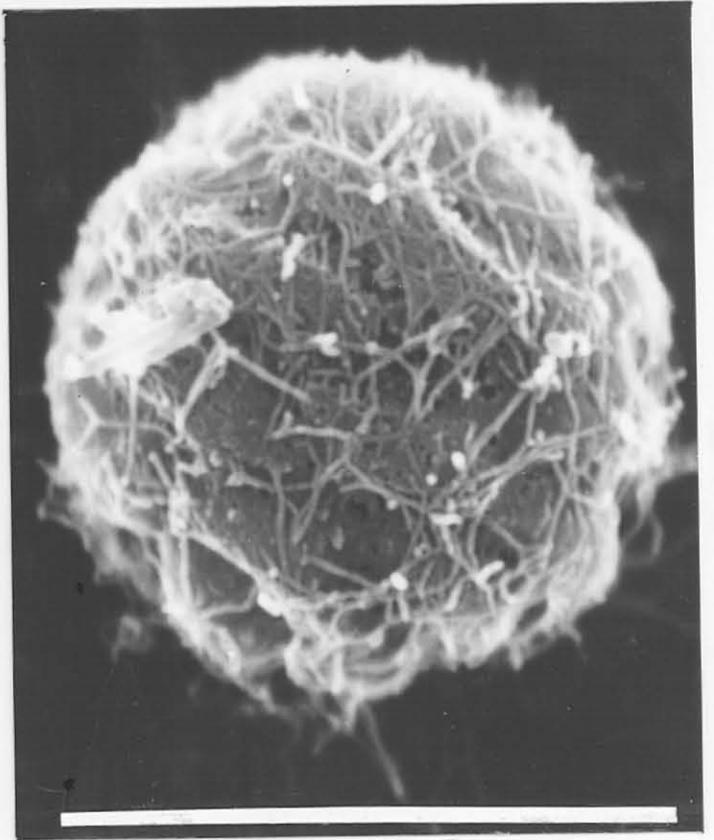


Fig. 6

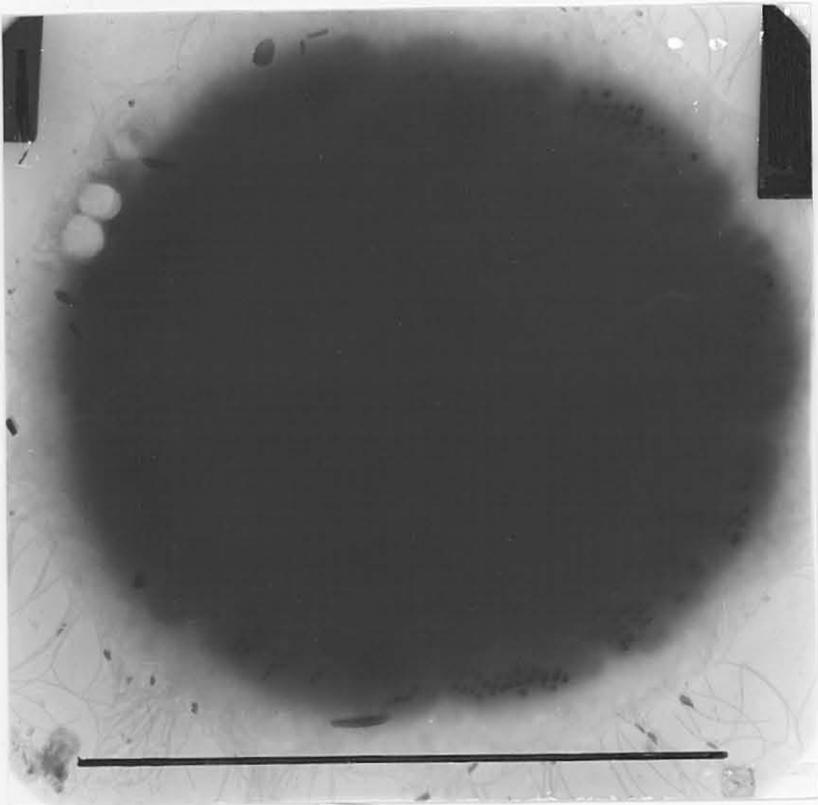


Fig. 7a

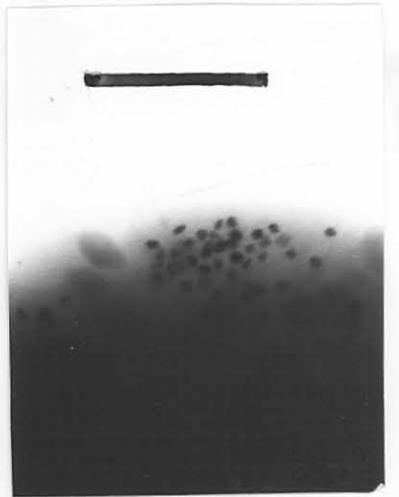


Fig. 7b

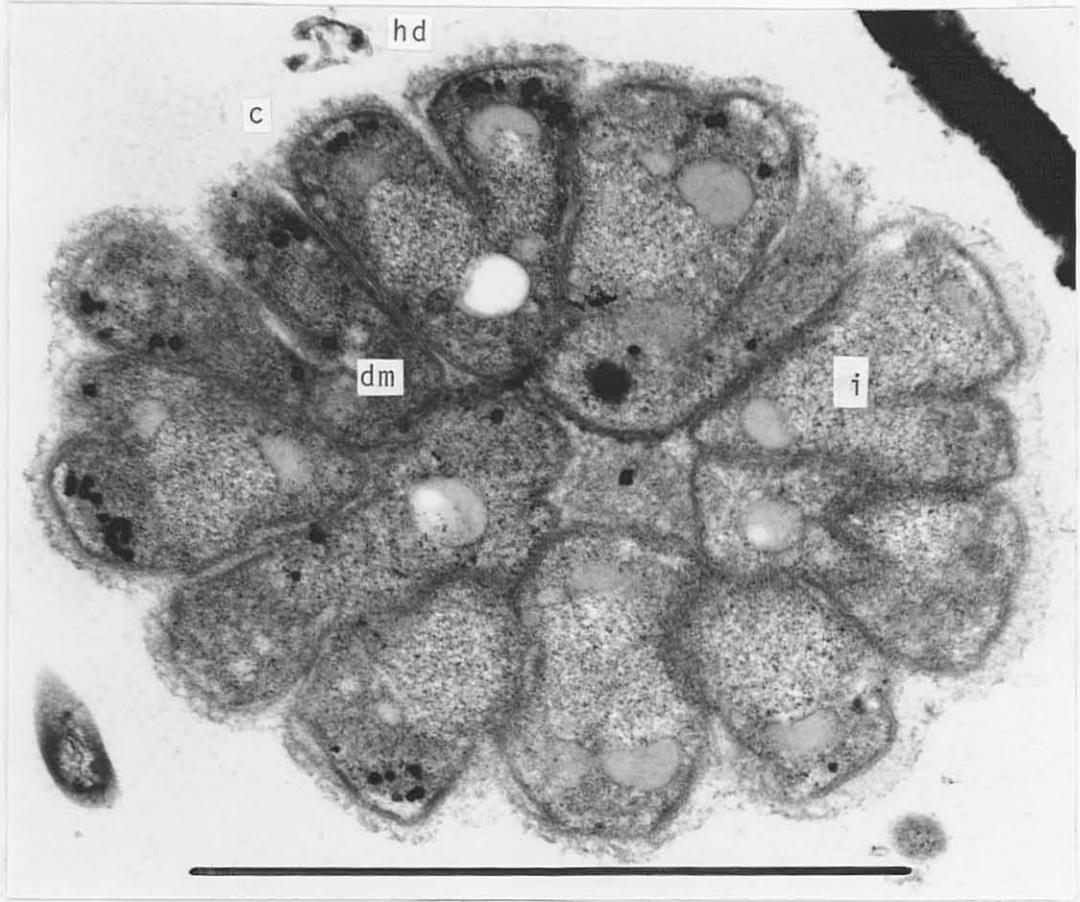


Fig. 8a

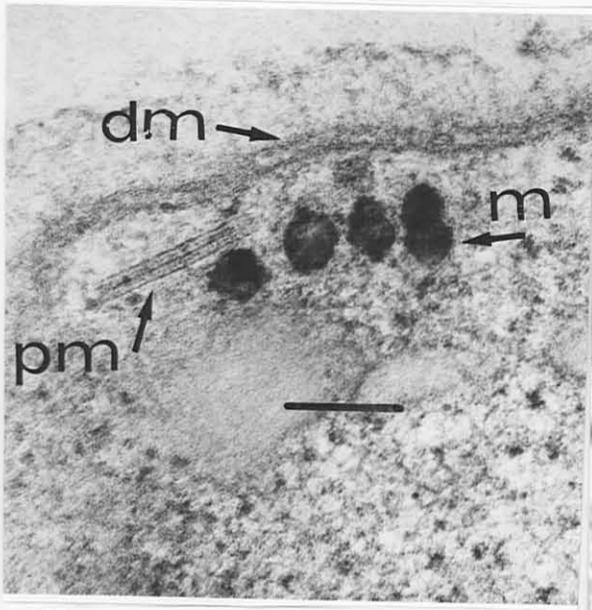


Fig. 8b

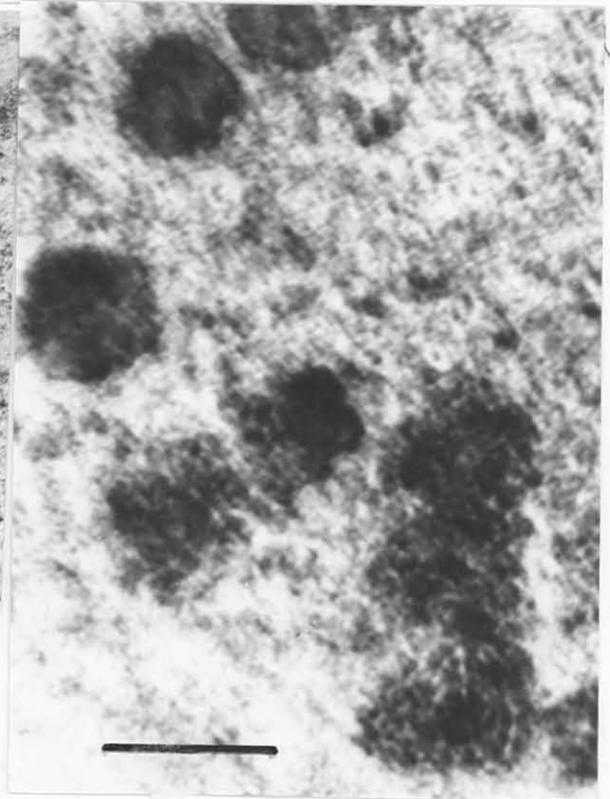


Fig. 8c

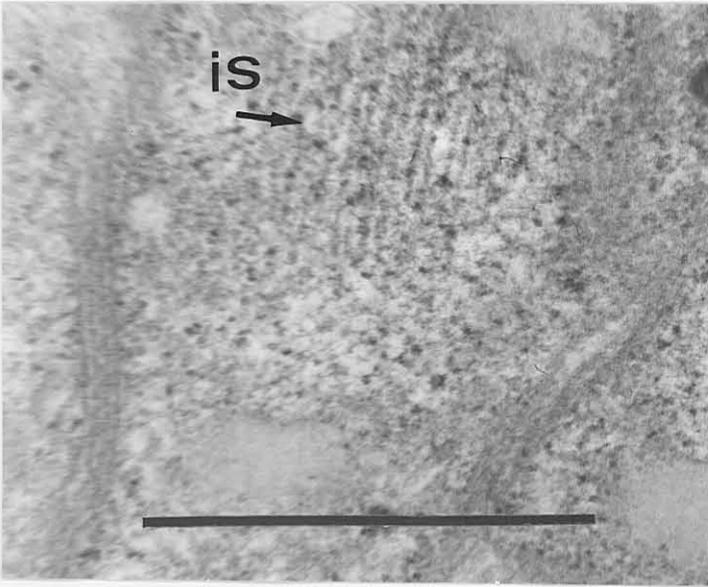


Fig. 8d

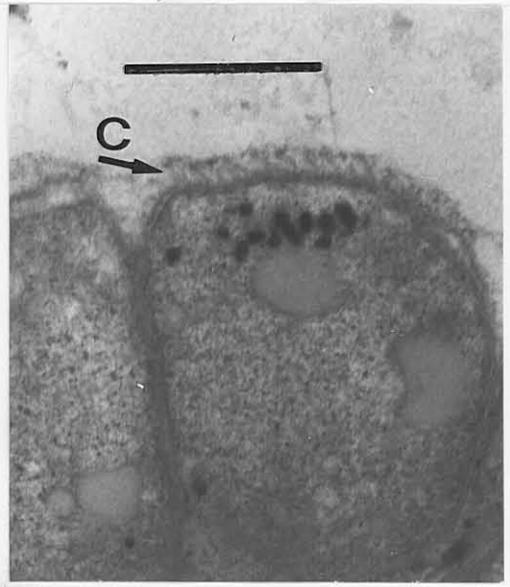


Fig. 8e

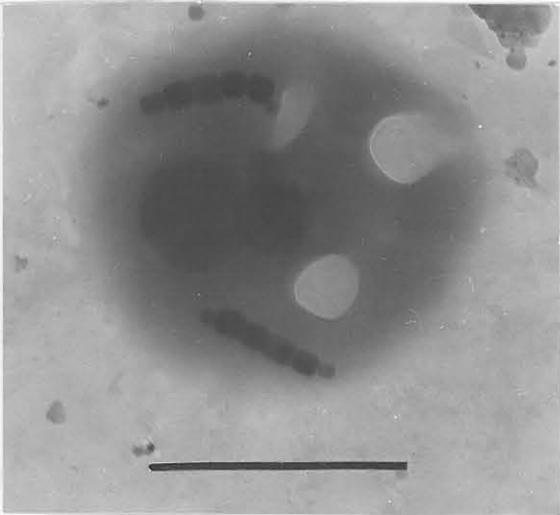


Fig. 9

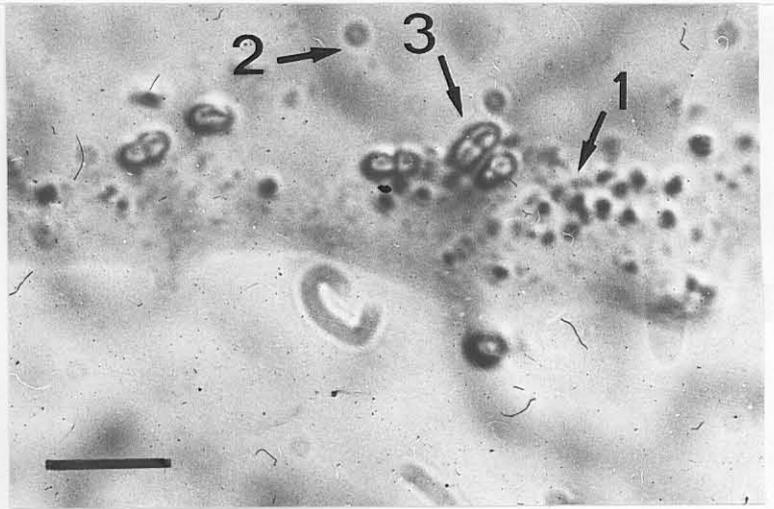


Fig. 10



Fig. 11

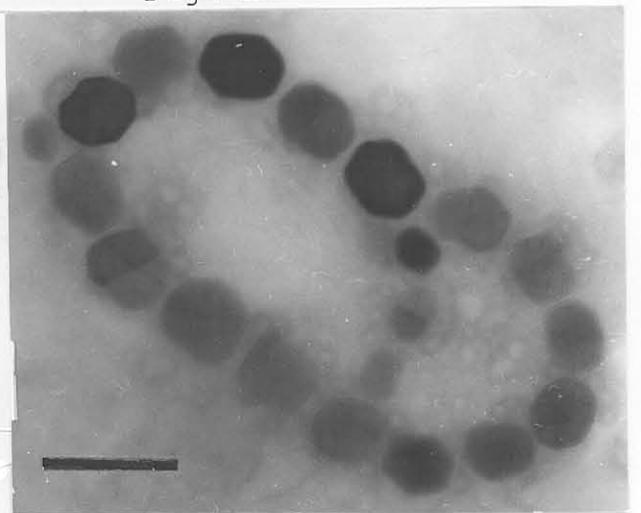


Fig. 12

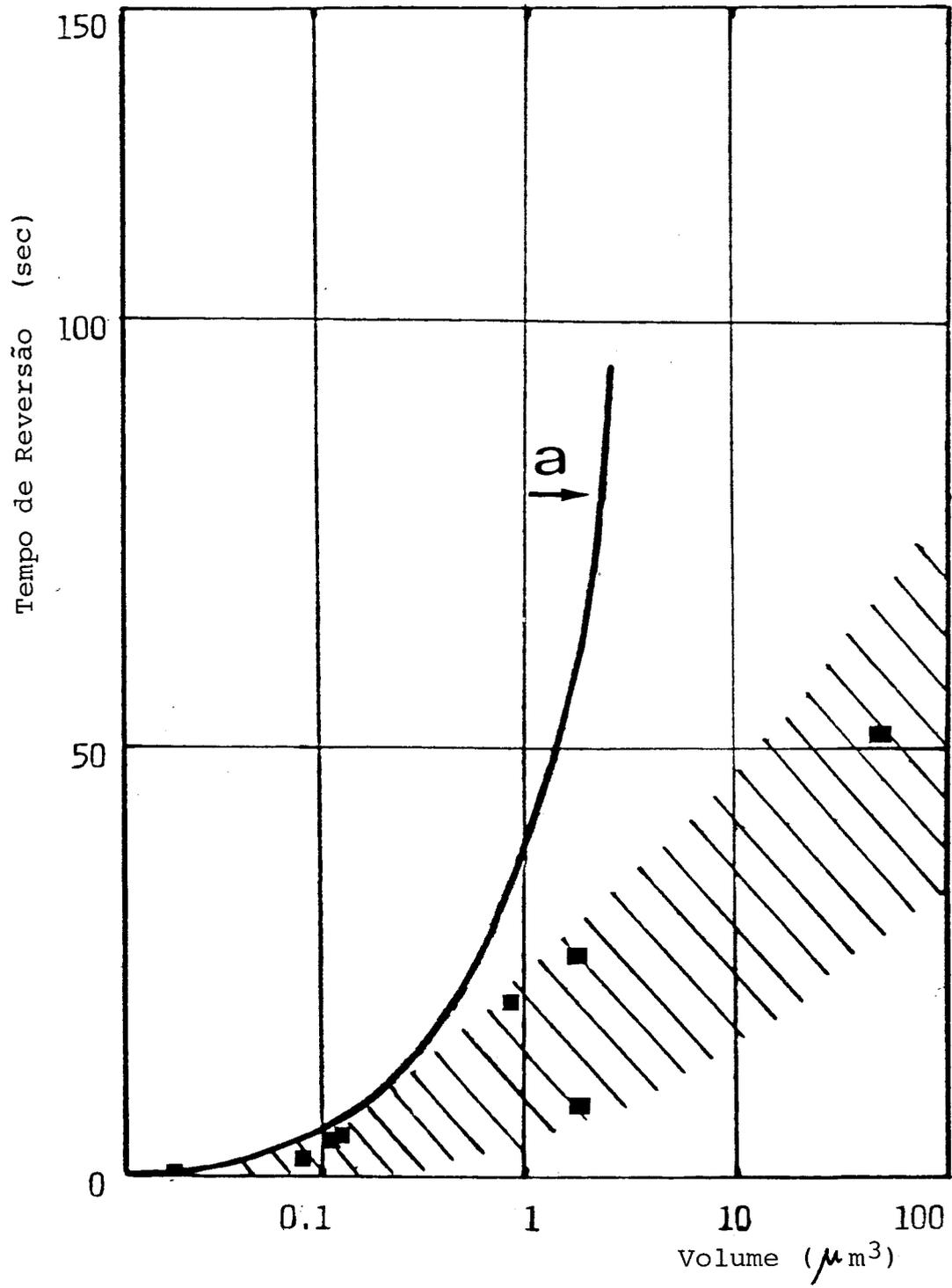


Fig. 13

Local	Caracterização	$\langle r \rangle$ (μm)	n	B=9.3G $\langle v \rangle$ ($\mu\text{m/s}$)	τ_{calc} (sec)	B=9.3G τ (sec)	B=9.3G L (μm)	10^{-12}emu M.E.	10^{-12}emu Volta U	mB_0/kT	τ_{B_0} (sec)
AGUA DOCE	1 	0.5	5	100	.08	.05	3	0.5	0.3	3	0.5
	2 	1	7	50	.3	.3	8	0.7	0.5	4	3.6
	3 	3x5	-	12	.9	1.3	8	-	1	6	20
	4 	0.9	10			0.09		1.4	-	8	1.5
R. DE FREITAS	5 	2.5	> 1000	40	1.3	1.4	30	-	2.4	17	25
	6 	0.9	10			.1		1.3	-	8	1.5
BAIA DE GUANABARA	7 	2.5	-	70	.3	.4	11	-	8	48	8.9
	8 	10x18	-	30	.4	2.1	20	-	54	326	50

- TABELA 1 -