



UNIVERSIDADE
AbERTA
www.uab.pt

**MICROORGANISMO E AMBIENTE:
AR E ÁGUA, SOLO E EXTREMOS**

Paula Bacelar Nicolau
2016



ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	3
2. MICROBIOLOGIA DO AR	5
3. MICROBIOLOGIA AQUÁTICA	8
3.1 FORMAS DE DESENVOLVIMENTO DOS MICRORGANISMOS EM AMBIENTES AQUÁTICOS	8
3.2 TIPOS DE AMBIENTES AQUÁTICOS	13
4. MICROBIOLOGIA DO SOLO	27
4.1 COMUNIDADES MICROBIANAS EM SOLOS DE SUPERFÍCIE	30
4.2 ATIVIDADE MICROBIANA NA ZONA VADOSA	39
4.3 ATIVIDADE MICROBIANA NA ZONA SATURADA (OU AQUÍFEROS SUBTERRÂNEOS)	40
5. MICROBIOLOGIA EM AMBIENTES EXTREMÓFILOS	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

1. Introdução

Na natureza, e como sistemas abertos que são, os microrganismos interagem com o seu meio ambiente e com outros organismos, sejam eles microrganismos, plantas ou animais. Através das suas atividades, e das suas interações bióticas, os microrganismos podem causar alterações químicas de relevo ao meio ambiente, que podem ser prejudiciais ou benéficas para outros organismos.

Para além de associações estreitas e benéficas, como aquelas formadas por bactérias do género *Rhizobium* e plantas leguminosas, através da formação de *nódulos radiculares*, os microrganismos desempenham funções críticas na natureza, como produtores primários, decompositores e recicladores de matérias primas necessárias aos ciclos de vida globais. Podem também causar alterações prejudiciais a outros organismos, como os efluentes ácidos das minas.

Os habitats naturais dos microrganismos são extremamente diversos. Do mesmo modo que em cultura laboratorial, a sobrevivência e crescimento dos microrganismos depende das condições físicas e químicas, bem como dos recursos nutritivos. Estas características físico-químicas e nutritivas definem o *nicho* de cada microrganismo, ... e existem incontáveis nichos microbianos na Terra.

Para além disso, como os microrganismos são microscópicos (ex. um bacilo poderá ter dimensões $1 \times 3 \mu\text{m}$), os seus ambientes naturais microscópicos são - *microambientes*. Por exemplo, numa partícula de solo de 3 mm de diâmetro (média) diferentes ambientes podem ser encontrados com características física e químicas distintas. A Figura 1 mostra os resultados obtidos da medição do teor do nutriente oxigénio de uma partícula de solo; num curto espaço, a sua concentração pode variar de 0 % (anóxica) para 21 % (óxica), o que explica como microrganismos de tipos fisiológicos distintos podem existir e estar ativos numa área tão pequena. Estas características físico-químicas podem sofrer rápidas alterações espaciais e temporais.



Fig. 1 - Mapa de contornos de concentrações de oxigénio em redor de uma partícula de solo obtido com recurso a um microelétrodo. Os eixos indicam as dimensões da partícula; os números nos contornos indicam a concentração de oxigénio (em percentagem; o ar contém 21 % O₂). Cada zona pode ser considerada um microambiente distinto.

Na natureza os nutrientes são, em geral, introduzidos de uma forma intermitente, havendo uma alternância de períodos de “fartura” (ex. aparecimento de um peixe morto ou de restos de folhas) com períodos de privação de nutrientes. As condições raramente se assemelham às óptimas estudadas em laboratório, e o metabolismo dos microrganismos funciona em “on-off” em função das condições físico-químicas e nutritivas. Nestas situações naturais o estabelecimento de associações, quer competitivas quer cooperativas, existe, sendo estas intensas.

Nas secções que se seguem abordar-se-ão quatro tipos de ambiente natural de importância em microbiologia ambiental.

2. Microbiologia do ar

O termo *aerobiologia*, foi introduzido em 1930's e é definido como o estudo da aerolização, transmissão aérea e transmissão de materiais biológicos. Esta ciência relativamente recente, tem-se tornado progressivamente mais importante devido à sua ligação às áreas científicas associadas à saúde pública, engenharia ambiental, à guerra biológica ou à exploração do espaço.

A *aeromicrobiologia*, num senso lato, é o estudo de todas as formas microbianas vivas no ar. Em microbiologia ambiental, a aeromicrobiologia pode ser definida como o estudo dos vários aspetos da aerobiologia (intra- e extra-mural) relativamente à transmissão, por via aérea, de microrganismos de importância do ponto de vista ambiental, incluindo vírus, bactérias, fungos e protozoários. Para além das formas de vida microbiana, outros materiais de origem biológica como o pólen, esporos fúngicos, partículas de descamação ou dejetos de insetos ou de ácaros (reconhecidos alergénos) são também estudados no âmbito da aeromicrobiologia. Muitos microrganismos causadores de doenças em plantas ou animais são transmitidos via aérea, sendo alguns exemplos indicados na tabela 1.

Tabela 1. Algumas doenças causadas em seres humanos e alguns dos seus agentes patogénicos, de transmissão aérea

Doença	Agente patogénico
Viral Gripe Varicela Varíola Rubéola Febre de Dengue	Virus de Influenza Virus de Varicella Virus de Varíola Virus de Rubéola Virus de Flavivirus
Bacteriana Difteria Meningite Pneumonia Tuberculose Tosse convulsa	<i>Corynebacterium diphtheriae</i> <i>Neisseria meningitidis</i> , <i>Streptococcus pneumoniae</i> <i>Mycoplasma pneumoniae</i> , <i>Streptococcus pneumoniae</i> <i>Mycobacterium tuberculosis</i> <i>Bordetella pertussis</i>
Fúngica Aspergilose Blastomicose Histoplasmose	<i>Aspergillus fumigatus</i> <i>Blastomyces dermatidis</i> <i>Histoplasma capsulatum</i>
Protozária Pneumocistose	<i>Pneumocystis carinii</i>

Distribuição dos microrganismos no ar

O habitat *atmosfera* é caracterizado por intensidades luminosas elevadas, variações de temperatura extremas, concentrações baixas de matéria orgânica e escassez de água, o que a torna um ambiente adverso para os microrganismos e, de um modo geral, inadequado para o seu crescimento. Apesar destas condições, uma diversidade considerável de microrganismos é detetada nas camadas mais baixas da atmosfera.

Tabela 2. Microrganismos detetados na atmosfera (in Sharma, 2005)

Tipos de microrganismos	Percentagem relativa
Bactérias	
Bastonetes pleomórficos, Gram-positivos, como <i>Corynebacterium</i>	20
Bastonetes Gram-negativos, como <i>Flavobacterium</i>	5
Géneros formadores de endósporos, como <i>Bacillus</i>	35
Cocos, Gram-positivos, como <i>Micrococcus</i>	40
Fungos	
<i>Cladosporium</i>	80
<i>Alternaria</i>	5
<i>Penicillium</i>	2
Outros	13

A camada atmosférica de maior interesse em aeromicrobiologia é a região inferior da troposfera, designada por *camada limite atmosférica* que se encontra diretamente em contato com a superfície terrestre, sofrendo assim a sua influência direta (Fig. 2). Esta camada limite atmosférica, caracterizada por fenómenos de turbulência, estende-se até cerca de 0,1 km da sua superfície (durante a noite) ou 1 a 2 km da superfície terrestre (durante o dia). Apesar de também se encontrarem microrganismos nas camadas superiores da troposfera, é esta a camada a grande responsável pelo transporte horizontal de partículas a curtas e longas distâncias.

Os microrganismos não são indígenas da atmosfera, mas apenas populações alóctones transportadas de habitats aquáticos e terrestres para (e através) a atmosfera, por ação do vento e associadas a partículas de solo, folhas, etc.

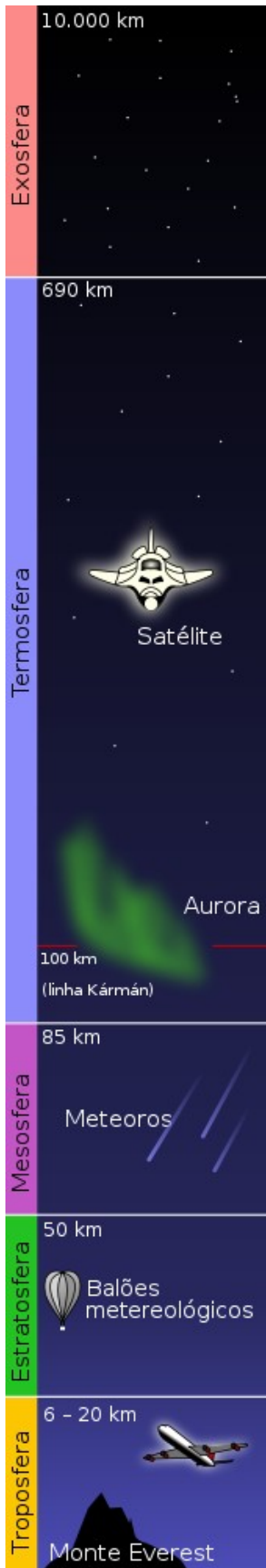


Fig 2. Camadas da atmosfera.

Os microrganismos encontrados variam muito na sua sensibilidade a valores de temperatura, humidade relativa e exposição à radiação.

Assim, e de um modo geral, o número de microrganismos no ar é superior nas regiões sobrejacentes às zonas terrestre do que às massas oceânicas. Esporos de fungo, em particular dos géneros *Alternaria*, *Cladosporium*, *Penicillium* e *Aspergillus* são mais numerosos sobre o mar e a distâncias de cerca 650 km da terra (nas massas de ar tropical e polares).

As formas de microrganismos encontradas no ar, em regiões povoadas, terrestres (até 150 m da superfície do solo, e tempo seco) incluem esporos de *Bacillus* e *Clostridium*, ascósporos de diversas leveduras, fragmentos de micélio e esporos de bolores e estreptomicetos, cistos de protozoários, algas, pólen, *Micrococcus*, *Corynebacterium*, etc.

Em espaços escolares e hospitalares são, com alguma frequência, detetados agentes infecciosos como o streptococci, pneumococci ou staphilococci.

Estas bactérias causadores de doenças respiratórias são dispersas no ar pelas gotículas de saliva ou muco provenientes da tosse, espirros, etc. Pequenas gotículas, em atmosfera seca e quente, secam antes de atingir o solo, sendo rapidamente dispersas. Estima-se que uma gotícula de espirro contenha entre 10^5 a 10^6 bactérias.

Viroses do tracto respiratório e algumas viroses do tracto digestivo também são transmitidas através do ar e poeira. Muitos agentes patogénicos de plantas, como esporos de fungos são igualmente transportados e dispersos através do ar (Fig.3).

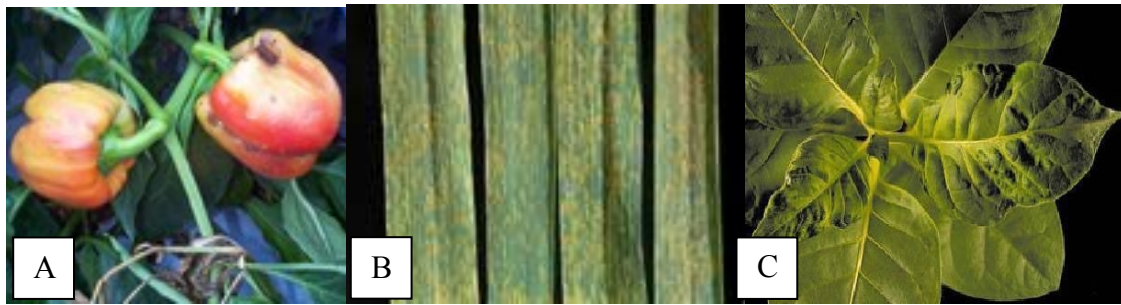


Fig. 3 – (a) Pimentos infetados com *Pepper mild mottle vírus*. (b) “Ferrugem” e “ferrugem-da-folha” (entre outros nomes) é a designação dada a um conjunto de infeções de plantas, causadas por fungos basidiomicetos, que originam lesões de coloração amarelado-avermelhado, e aspeto pulverulento, semelhante à ferrugem dos metais. Na foto, ferrugem na folha de alho francês. (c) Vírus de mosaico do tabaco que infeta muitas Solanáceas, causando lesões com o aspeto de um mosaico foliar.

3. Microbiologia aquática

Os ambientes aquáticos ocupam cerca de 70% da superfície da Terra. Destes, 97% são marinhos. A maioria dos ambientes aquáticos marinhos encontra-se a temperaturas de 2 a 3 °C e sem luz; 62% destes existem sob pressões elevadas (> 100 atm). A comunidade microbiana, nestes ambientes, forma uma rede alimentar complexa estendendo-se em superfície e profundidade. Apesar da sua imensa extensão, os ambientes marinhos já se encontram afetados por poluição, em particular nas zonas costeiras.

Os sistemas de água doce, uma pequena parte das águas presentes na Terra, são de extrema importância como fonte de água potável. Em muitos locais a contaminação de águas de superfície ou sub-superficiais por resíduos domésticos ou industriais causam graves problemas ambientais.

3.1 Formas de desenvolvimento dos microrganismos em ambientes aquáticos

Os microrganismos encontram-se nos ambientes aquáticos na forma planctónica, bentónica, nos tapetes microbianos e em biofilmes.

Plâncton. O plâncton constitui a comunidade microbiana presente na coluna de água. Pode ser subdividido em *nécton*, que engloba as formas existentes “livres” na água, *pleuston*, as formas que se localizam na camada superficial da água, na interface água-atmosfera, e *perifíton*, que são aquelas que se encontram aderentes às plantas aquáticas e algas.

O plâncton pode ainda ser subdividido, em função do seu papel na cadeia alimentar, em *fitoplâncton*, formado pela comunidade de microrganismos planctónicos fotossintéticos (essencialmente as algas e cianobactérias), *bacterioplâncton*, formado pela comunidade de bactérias heterotróficas em suspensão na coluna de água, e *zooplâncton*, constituído pela população de protozoários. Estes três grupos formam a comunidade microbiana da cadeia alimentar planctónica, cujas relações e interdependências são ilustradas na Fig. 4. As formas de fitoplâncton constituem os produtores primários deste tipo de cadeia alimentar.

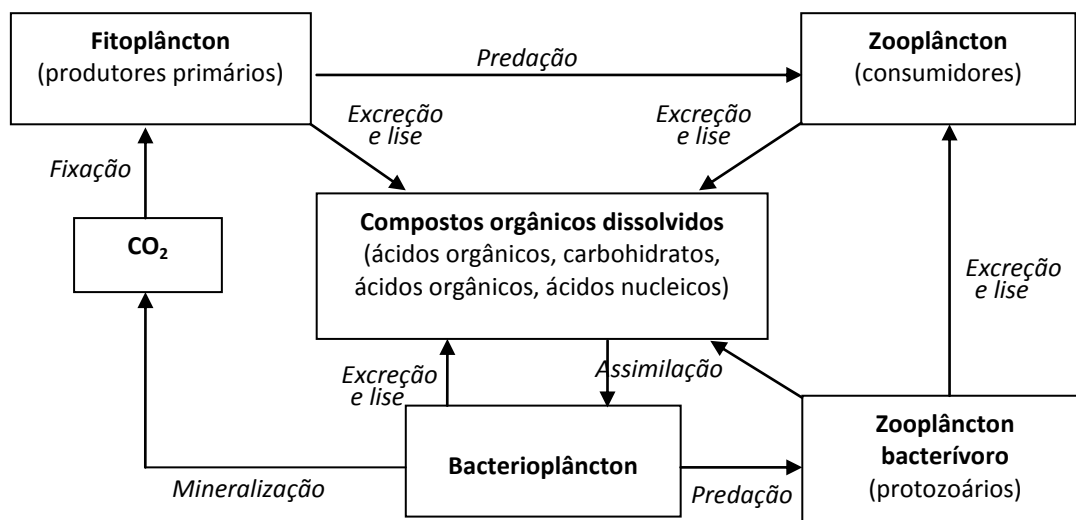


Fig. 4 – O elo microbiano numa cadeia alimentar planctónica (adaptado de Sharma 2005).

Bentos. Bentos é um termo que designa tanto a zona de transição entre a coluna de água e a subsuperfície mineral (do fundo do ambiente aquático em estudo), também designada por zona bentónica, como a comunidade que aí se aloja. A zona bentónica “recolhe” a matéria orgânica que se sedimenta proveniente, tanto da coluna de água, como dos ambientes terrestres, e é assim uma mistura difusa, não-campata, formada por matéria orgânica, matéria mineral particulada e água. Esta zona é caracterizada por

um grande aumento da biomassa microbiana (pode ser 5 vezes maior ou mais), comparativamente com aquela presente no plâncton. O sedimento favorece a formação de microambientes com características que possibilitam a subsistência conjunta de microrganismos aeróbios e anaeróbios.

A zona bentónica suporta uma comunidade de microrganismos aquáticos de grande diversidade fisiológica. As bactérias fermentativas metabolizam materiais orgânicos dissolvidos, libertando ácidos orgânicos (ex. ácido acético) e CO₂. Estes ácidos orgânicos atuam como dadores de eletrões para bactérias anaeróbias, que utilizam o CO₂ como aceitador final de eletrões no processo de respiração anaeróbia e produzem metano (CH₄). A atividade metanogénica, suporta, por sua vez, a atividade das bactérias oxidantes de metano, que em condições aeróbias podem utilizar metano, ou outros compostos orgânicos com um átomo de C, como fonte de energia, produzindo CO₂.

Tapetes microbianos. Nos habitats bentónicos, a interface sedimento-plâncton forma um microambiente no qual a combinação de atividades aeróbias e anaeróbias sustenta a existência de uma diversidade de populações microbianas. Estas populações de microrganismos formam uma rede complexa de inter-relações fisiológicas, dinâmicas, num espaço temporal e físico reduzido. Os tapetes microbianos formam comunidades únicas e são frequentemente encontrados em associação com ambientes extremos ou condições flutuantes, por exemplo, aqueles associados às nascentes hidrotermais dos fundos oceânicos (fumarolas negras), lagos hipersalinos e zonas estuarinas.

Os tapetes microbianos podem ter espessuras entre alguns milímetros a alguns centímetros, e estratificam-se verticalmente em camadas distintas, como exemplificado na figura 5. Neste esquema, as cianobactérias ocupam a parte superior do tapete, onde têm acesso à luz solar. Uma camada de ferro oxidado (de origem ainda desconhecida) forma-se geralmente logo abaixo da camada de cianobactérias, e parece constituir uma barreira entre as atividades fototróficas aeróbias e anaeróbias. As bactérias púrpuras sulfurosas podem formar uma camada distinta logo abaixo da interface aeróbica-anaeróbica. Estas são bactérias fotossintetizantes, mas que utilizam compostos reduzidos de enxofre como dadores de eletrões. Estes compostos de

enxofre são, por sua vez, resultado do metabolismo de bactérias redutoras de enxofre. Assim, logo abaixo da camada de bactérias púrpuras sulfurosas, encontra-se uma camada preta enriquecida com precipitados de FeS.

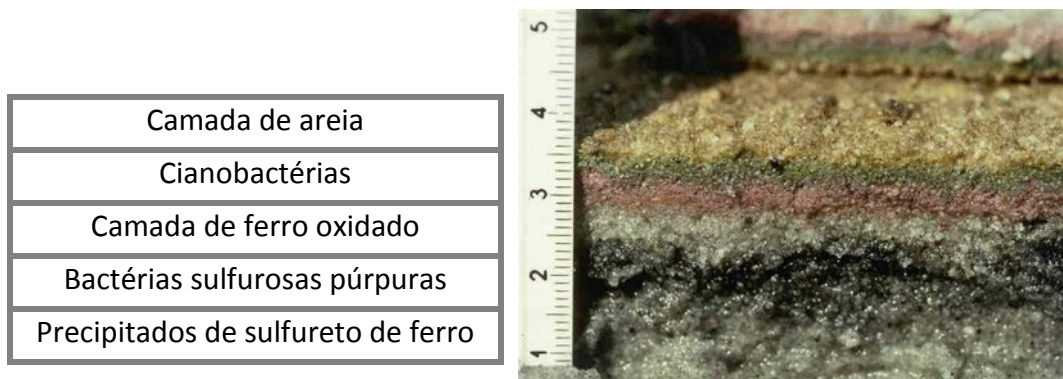


Fig. 5 - Representação esquemática de parte de uma secção transversal vertical de um tapete microbiano associado a sedimento de um lago.

Biofilmes. O biofilme é uma comunidade biológica com um elevado grau de organização, constituída por uma camada de matéria orgânica (matriz polimérica) na qual se embebem os microrganismos (seus produtores). Os biofilmes podem desenvolver-se em qualquer superfície submersa ou húmida, e resultam da adesão e subsequente proliferação de bactérias na superfície de objetos. Os biofilmes podem desenvolver-se em qualquer interface sólido-líquido ou sólido-gasoso, por exemplo, em cascos de navios, na superfície dos dentes, próteses, condutas de água ou nos equipamentos das várias indústrias, desde a indústria farmacêutica à alimentar (Fig. 6) e são causadores (entre outros) da corrosão generalizada em oleodutos, assim como das cáries nos dentes e estão na origem de uma série de doenças, como a fibrose cística, úlceras, colites e infeções do ouvido.

O desenvolvimento de um biofilme requer, de um modo geral, a formação prévia de um filme condicionante de moléculas orgânicas nas superfícies a colonizar pelas bactérias. A acumulação de moléculas orgânicas na superfície de sólidos serve de “atrator” à adesão de bactérias, que o atingem induzidas quer por movimento de fluxos da fase líquida quer pela sua própria motilidade. A adesão de bactérias na superfície de um sólido dá-se em duas fases: (1) fase reversível de adesão, mediada

por diversas ligações físico-químicas/ eletrostáticas e (2) fase irreversível de adesão, mediada por processo biológicos, nomeadamente pela produção de uma matriz de carboidratos pelas bactérias, designada *exopolímero*, que forma uma ligação química estável à superfície sólida (Fig. 7).

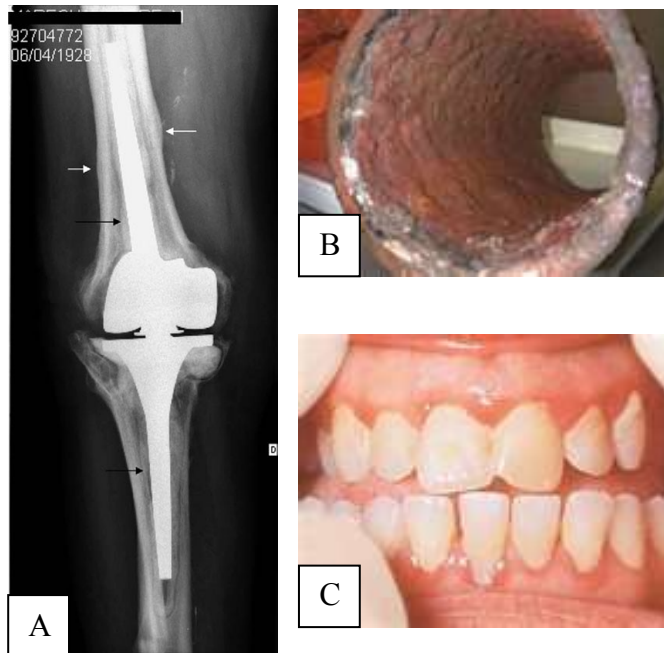


Fig. 6 - Exemplos de biofilmes.

(A) Placa em próteses articulares (setas indicam zonas de infecção por *Staphylococcus lugdunensis*; de <http://www.rumatologie.asso.fr/05-bibliotheque/publications/pub-73-337-344.asp>), **(B)** corrosão de condutas com problema, associados de corrosão, **(C)** placa nos dentes (neste biofilme, o consórcio de bactérias pode atingir a espessura de 300 – 500 células na superfície dentária, o que origina a acumulação de elevadas concentrações de metabolitos bacterianos, e a consequente degradação do dente).

O biofilme pode constituir uma boa estratégia de sobrevivência em ambientes hostis, pois permite a formação de microambientes particulares (de características diferenciadas) que possibilitam a colonização e proliferação de populações de microrganismos. O biofilme confere às bactérias nele presentes, por exemplo, uma maior resistência a antibióticos e desinfetantes. O biofilme é uma estrutura dinâmica, formada por agrupamentos de células rodeadas por espaços onde circula o meio e as moléculas em suspensão.

Em ambientes pobres, do ponto de vista nutritivo, a vida em biofilme é também uma boa estratégia de sobrevivência, pois permite uma maior eficiência na utilização dos nutrientes transportados pelos fluxos de água, atuando como filtros biológicos para a remoção de materiais orgânicos nela dissolvidos. Este sistema “natural” é explorado na purificação de águas em sistema de tratamento de água residuais ou de provenientes de indústrias.

A colonização bacteriana de interfaces sólido-líquido pode ser benéfica, do ponto de vista dos interesses humanos, como é o caso dos sistemas de purificação de água ou dos ciclos naturais de nutrientes. No entanto, o desenvolvimento de biofilmes também pode ser prejudicial às atividades humanas, como são as situações associadas à corrosão de superfícies (ex. cascos de navios, condutas de águas, indústrias farmacêuticas e outras, etc.) ou à diminuição de capacidade de fluxo ou de eficiência de trocas térmicas em condutas de água de várias indústrias.

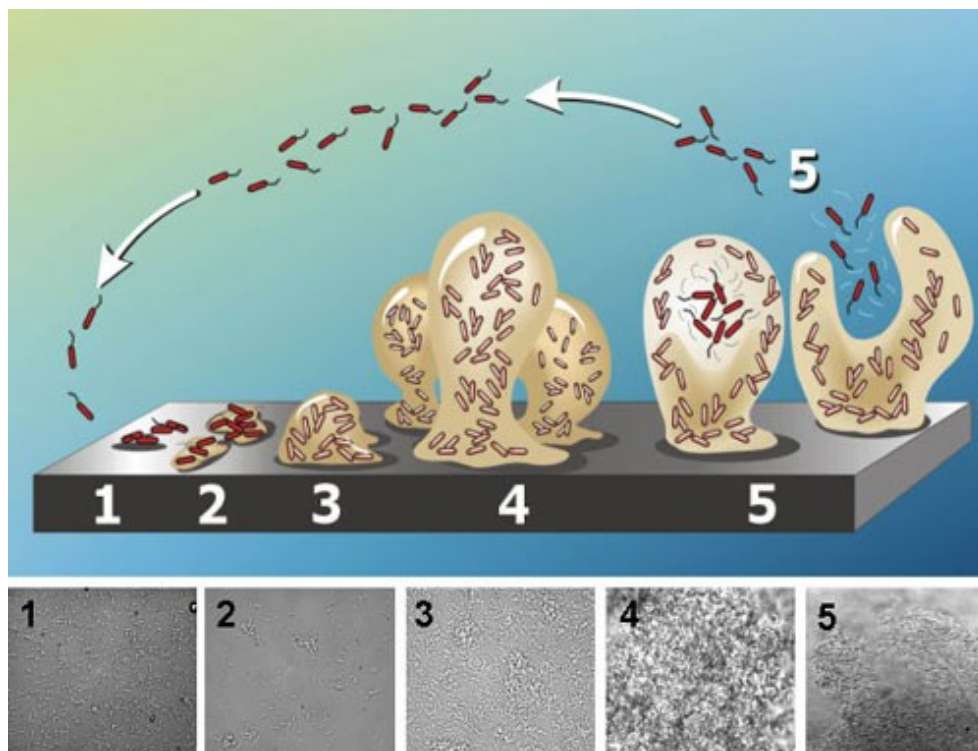


Fig 7 -. Esquema ilustrativo e fotografias (microscopia eletrónica de varrimento) das etapas de formação de um biofilme: (1) Adesão reversível (seg), (2) adesão irreversível (seg – min), (3) crescimento e multiplicação das bactérias (h – dias), (4) produção de exopolímero e formação de biofilme (h – dias), adesão de outros microrganismos ao biofilme (dias – meses), (5) libertação de células para colonização de outras superfícies.

3.2 Tipos de ambientes aquáticos

Os ambientes aquáticos são classificados com base nas suas características físico-químicas e microbianas em 4 tipos básicos: sistemas de água doce (nascentes, rios, ribeiras, lagos); ambientes estuarinos ou salobros; ambientes marinhos (mares, oceanos) e águas subterrâneas.

3.2.1 Sistemas de água doce

Sistemas de água doce são os sistemas de água que não são diretamente influenciados por água salgada. A ciência que estuda os ambientes /habitats de água doce, sob todos os aspetos (físico, químico, geológico e biológico), é a *limnologia*, enquanto que a ciência que estuda os microrganismos que vivem nos ambientes de água doce é a *microlimnologia*. Estes sistemas/ habitats ocupam uma pequena percentagem da superfície da terra comparativamente com aquela que é ocupada pelos sistemas marinhos, mas são de grande importância para a espécie humana.

Os sistemas de água doce podem dividir-se em (1) *sistemas lênticos* ou de águas paradas, que incluem lagoas, lagos e pântanos e (2) *sistemas lóticos* ou de água corrente.

Nascentes. As nascentes formam-se onde as águas subterrâneas entram em contato com a superfície terrena. Existem diversos tipos de nascentes. Por exemplo, as nascentes hidrotermais originam-se em áreas de atividade vulcânica ou de grandes profundidades no interior na Terra (não-vulcânicas, nascentes geotérmicas). Nascentes de água fria resultam do degelo de neve e gelo de montanhas ou de glaciares. Com base nas suas distintas composições químicas ou minerais podemos classificar as nascentes em sulfurosas, nascentes de magnésio, nascentes ácidas, nascentes radioativas. A comunidade de microrganismos encontrada nestes ambientes é maioritariamente formada por bactérias e algas autotróficas – organismos fotossintéticos e produtores primários. A maior parte da matéria orgânica dissolvida nestes ambientes é proveniente dos sistemas terrestres adjacentes (exsudados de plantas, decomposição de matéria orgânica morta, etc.).

Rios, ribeiras. A água das nascentes, à medida que se afasta do local de interface da água subterrânea com a superfície terrena, une-se a outros cursos de água e forma ribeiras e rios que eventualmente fluem para lagos, mar ou o oceano.

A maioria das suas características físico-químicas (temperatura, características químicas, volume, velocidade de fluxo) é determinada pela geografia e clima da área através da

qual o curso de água flui. De um modo geral, a secção de um rio, a montante (mais próxima da nascente), é caracterizada por um fluxo rápido, com um elevado grau de oxigenação e temperatura relativamente baixa. No seu curso intermédio, os rios apresentam geralmente uma diminuição do fluxo de água, menor grau de oxigenação e temperatura mais elevada. Os rios são geralmente pouco profundos.

À medida que um curso de água aumenta de dimensão, tende a acumular mais matéria orgânica e populações de microrganismos heterotróficos, provenientes dos terrenos adjacentes. Assim, o perfil da comunidade microbiana num curso de água – ribeira ou rio – assemelha-se muito à comunidade microbiana dos terrenos adjacentes ao mesmo. Nestes ambientes, os produtores primários são os microrganismos fotossintéticos. O aumento de quantidade de matéria orgânica dissolvida, ao longo do curso de água, limita a penetração da luz, o que se reflete na diminuição dos números de microrganismos fotoautotróficos. Em paralelo, e ao longo do curso de água, observa-se um aumento dos microrganismos heterotróficos. A água de ribeiras e rios é, devido aos padrões dos seus fluxos, bem arejada, e assim a maioria dos microrganismos heterotróficos é aeróbia ou anaeróbia facultativa.

Os rios recebem frequentemente, a jusante, elevadas quantidades de efluentes provenientes da indústria ou de águas residuais domésticas, o que resulta no aumento brusco da concentração de compostos orgânicos (Fig. 8). Em consequência, e devido à atividade microbiana de decomposição desses compostos orgânicos, a concentração de oxigénio diminui na porção do curso de água a jusante. Os efluentes industriais podem também introduzir compostos químicos tóxicos, como por exemplo os metais pesados que afetam a sobrevivência e atividade dos microrganismos. A adição de compostos orgânicos provenientes da lixiviação de terrenos agrícolas adjacentes aos cursos de água pode induzir efeitos adversos, tóxicos, na microbiota local, ou pode levar à proliferação descontrolada de microrganismos, como é o caso dos fertilizantes, estando neste caso frequentemente associada a processos de *eutrofização*.

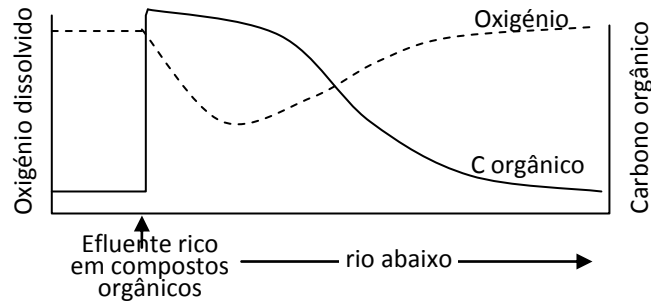


Fig. 8 - Relação entre o carbono orgânico e oxigénio dissolvido na água de um rio, a montante e a jusante de um ponto de descarga de efluentes de águas residuais domésticas (adaptado de Atlas e Bartha, 1993).

Relativamente aos cursos de água doce, é ainda de referir a existência de uma zona que faz a ligação entre as águas subterrâneas e os sistemas lóticos, que se designa por **zona hiporeica**. A zona hiporeica subjaz o leito dos rios e é a região onde há mistura das águas subterrâneas, de pouca profundidade, e das águas superficiais. A zona hiporeica pode conter substancialmente maior volume de água do que aquela que é vista no canal aberto do curso de água que lhe é subjacente; é importante para as interações entre os dois sistemas aquáticos, bem como a processos a eles associados, como por exemplo a desova de peixes.

Lagos, lagoas. Os lagos apresentam áreas superficiais de maior dimensão do que a das lagoas (até 100 000 km²) e são comparativamente muito mais profundos. Apesar de serem ambientes lênticos, apresentam fluxos de entrada e de saída de água, turbulência gerada pelo vento, e misturas de água causadas pelas alterações de temperatura, criando assim um ambiente dinâmico. Alguns lagos têm um conteúdo salino elevado (por vezes representado ambientes extremos), e podem ser caracterizados pelas suas características químicas em lagos de elevado teor de MgSO₄, lagos de elevado teor de Na₂B₄O₇, lagos com elevado teor de NaHCO₃.

Com base nas características morfométricas (profundidade, dimensão, geologia das margens, correntes, etc.) e físico-químicas (pH, nível de oxigénio, temperatura) os lagos apresentam zonas distintas (Fig. 9). A *zona litoral* é a região de água, junto à margem do lago, na qual a luz solar penetra efetivamente até ao fundo do lago. Esta é a zona onde se encontra a maioria da vegetação aquática (plantas aquáticas e

macroalgas). A *zona limnética* é a zona correspondente à camada superficial de água, na qual a luz penetra, mas em que o fundo do lago é demasiado profundo para suportar a vegetação aquática com raiz (excluindo, assim, a zona litoral). A zona limnética é delimitada inferiormente pela *profundidade de compensação* (o nível mais profundo em que há uma efetiva penetração da luz, *i.e.* onde a atividade fotossintética está em equilíbrio com a atividade respiratória; considera-se que a este nível apenas chega 1% da luz incidente). Esta área é ocupada pelo fitoplâncton (algas e cianobactérias; produtores primários predominantes nesta área), bem com zooplâncton, pequenos crustáceos e peixes. A maioria da atividade de fotossíntese

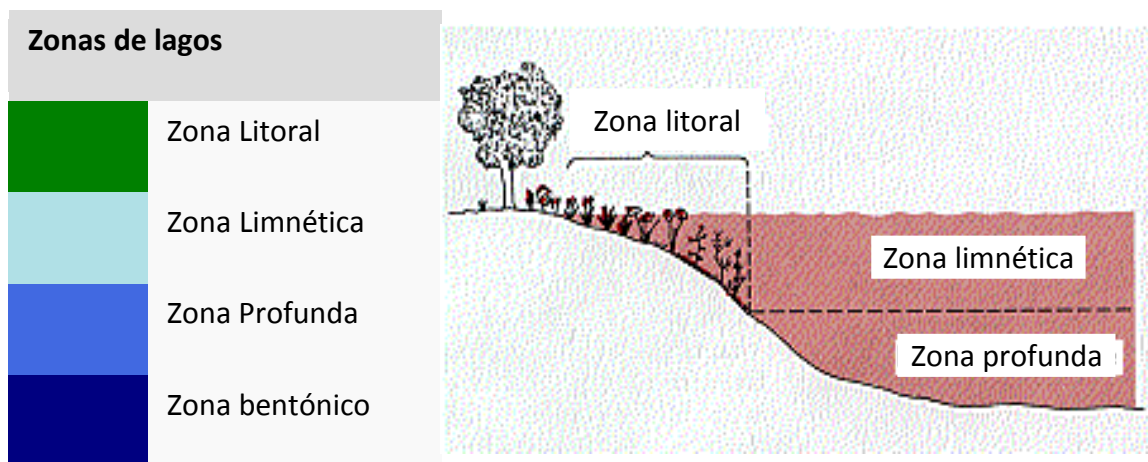


Fig 9 - Zonas de lagos, em função das suas características morfométricas e físico-químicas.

ocorre nesta área do lago. A *zona profunda* é a área subjacente e abaixo da zona limnética na qual a intensidade da luz é inferior a 1% da intensidade da luz solar. Esta zona fica, tipicamente abaixo da termoclina – a zona no eixo vertical em que a temperatura decresce abruptamente. A ausência de luz na zona profunda determina o tipo de comunidade biológica que aí se desenvolve, distinta da comunidade que se encontra acima dela. A *zona bentónica* é a região correspondente à camada inferior da massa de água, junto ao sedimento, e inclui a superfície do sedimento e algumas das suas camadas sub-superficiais. Os organismos desta zona são designados bentos. Muitos destes organismos vivem permanentemente ligados ao sedimento.

Conjuntamente, a zona litoral e a zona limnética, formam a *zona fótica* ou *eufótica* (sob a ação direta da luz solar), onde a atividade fotossintética pode ocorrer. A *zona*

afótica (praticamente sem luz, ou sem luz solar; subjaz à termoclina) corresponde, em grande parte, à zona profunda.

A interface da coluna de água com a atmosfera é designada por **pleuston**. Esta é caracterizada por uma intensa radiação solar, grandes flutuações de temperatura e ainda à acumulação de substâncias tóxicas (incluindo metais pesados). A zona superior do pleuston é formada por uma interface água-lípido, abaixo da qual se forma uma zona onde se acumula a matéria orgânica proveniente da coluna de água (Fig. 10). A camada de pleuston é por vezes, e devido às condições acima referidas, considerada um ambiente extremo. Nesta camada encontra-se grande parte dos microrganismos fotossintéticos.

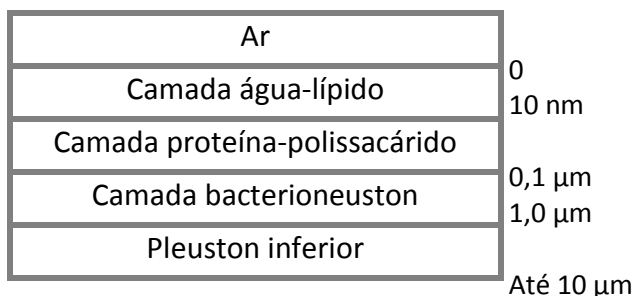


Fig. 10 - Representação esquemática da camada de pleuston.

A temperatura é um dos fatores importantes para a caracterização dos lagos. Durante o período de Verão verifica-se uma estratificação térmica, em que a camada superior pode atingir 22-24 °C enquanto que a temperatura das camadas mais inferiores pode manter-se a 4 °C. Entre estas regiões de temperaturas extremas consideram-se geralmente 3 zonas distintas: (i) o *epilímnio*, região superior onde se verifica um gradiente vertical, gradual, de temperatura (ii) a *termoclina*, região intermédia onde se verifica uma mudança drástica na temperatura (iii) o *hipolímnio*, a região mais profunda onde não é visível um gradiente de temperatura (Fig. 11). A intensa atividade primária na camada superficial de água (na presença da luz solar) resulta num elevado teor de oxigénio e de nutrientes. À medida que o fitoplâncton se desenvolve absorve os nutrientes da água; quando estes organismos morrem afunda-se para os níveis inferiores na coluna de água resultando assim numa depleção de nutrientes no epilímnio. O hipolímnio tem as características opostas ao epilímnio, ou seja, valores de

temperatura baixos, teores de oxigénio baixos, ausência de luz solar, mas um elevado conteúdo mineral.

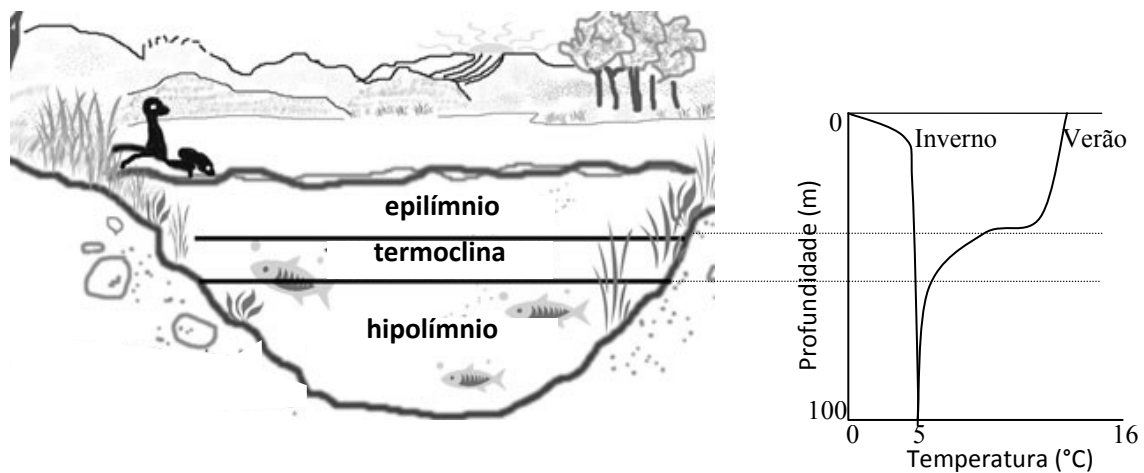


Fig. 11 – Estratificação térmica em lagos, de clima temperado, durante o Verão e o Inverno, mostrando o perfil de temperatura em função da profundidade. Na Primavera e Outono a termoclina desaparece resultando em mistura completa das águas.

As comunidades microbianas presentes em lagos, são complexas e as mais amplamente estudadas em sistemas aquáticos.

Na zona litoral, as formas de fitoplâncton predominantes são as algas, logo seguidas das cianobactérias. Algas filamentosas e epífitas ocorrem como perifíton. A zona limnética também é dominada pelas formas de fitoplâncton. Nesta, em função do comprimento de onda e da intensidade luminosa que penetra até cada profundidade, encontram-se distintos perfis de comunidades (Fig. 12). Cada grupo de microrganismos fotossintéticos tem o seu espectro de absorção de luz característico (Fig. 13).

Para além dos microrganismos fotoautotróficos, os lagos também possuem uma comunidade heterotrófica extensa. A sua concentração varia com a profundidade, sendo a produção secundária entre 20 a 30% da produção primária. Existem 3 zonas com números elevados de microrganismos heterotróficos: (i) a *camada de pleuston* (rica em proteínas e ácidos gordos) que cria condições eutróficas localizadas, (ii) a *termoclina*, onde se verifica a acumulação de materiais orgânicos e (iii) a *camada superior do bentos*. Os vírus também podem ser numerosos nos lagos e infetar

bactérias, cianobactérias e microalgas. Os protozoários também são importantes predadores de microrganismos aquáticos, em particular de algas e bactérias.

As camadas mais profundas dos lagos são anóxicas, onde os organismos aeróbios estritos não crescem. Nestas regiões as comunidades são compostas por microrganismos microaerófilos e anaeróbios estritos. O metabolismo predominante, respiratório nas camadas superiores da coluna de água, passa nas camadas profundas do lago a fermentativo e metanogénico.

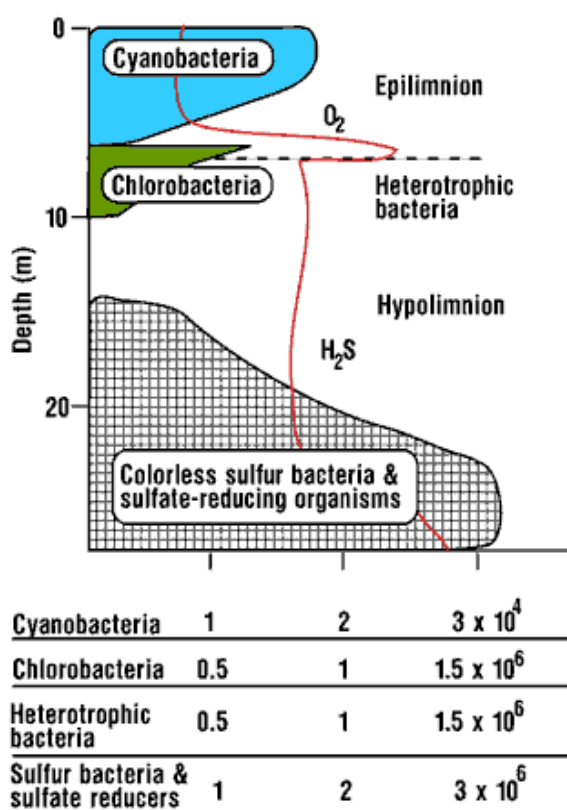


Fig. 12 – Distribuição vertical de bactérias num lago. As cianobactérias abundam no epilímnio. As bactérias sulfato-redutoras abundam no hipolímnio inferior. As bactérias heterotróficas são mais abundantes na zona que subjaz à zona de maior produção fotossintética e na interface água-sedimento (adaptado de Atlas e Bartha, 1993).

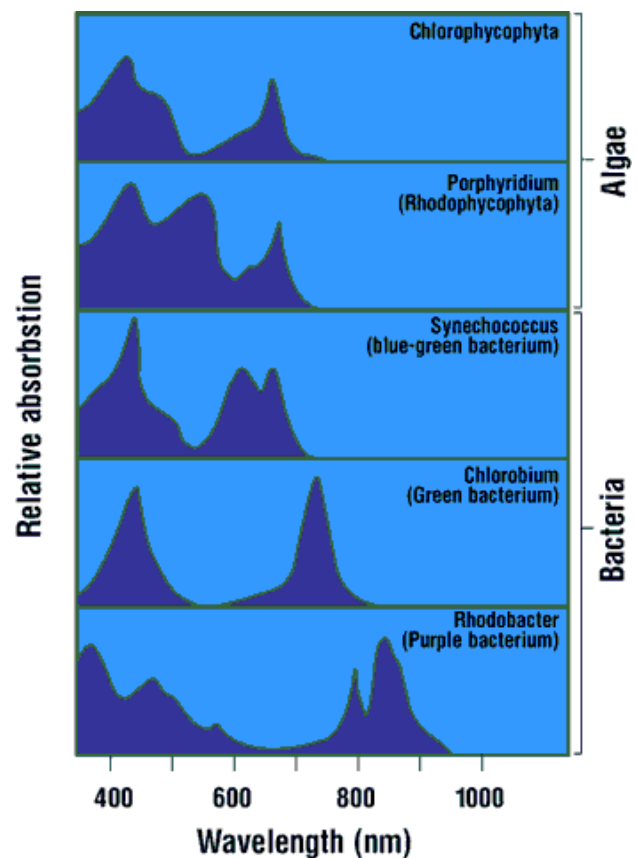


Fig. 13 - Espectros de absorção de luz de alguns microrganismos fotossintéticos comuns nos lagos. Note-se que *Chlorobium* e *Rhodospseudomonas* podem absorver na região espectro do vermelho longínquo o que, considerando que vivem a maior profundidade que as algas, é uma vantagem ecológica (adaptado de Atlas e Bartha, 1993).

3.2.2 *Sistemas de água salobra – Estuarinos*

“Água salobra” é um termo que designa os sistemas cuja água tem uma salinidade intermédia entre a água doce e a água dos sistemas marinhos. O seu melhor exemplo é o **sistema estuarino**. Um estuário pode ser definido como a zona de encontro entre as águas de rios e da zona hiporeica com as águas marinhas. As águas dos estuários são carateristicamente mais produtivas do que as águas marinhas ou doces.

Os estuários são ambientes em que carateristicamente se verificam grandes flutuações das condições físicas e químicas (temperatura, salinidade, pH, Eh, concentração de matérias orgânicas, etc.), em função da altura do dia ou da estação do ano. Flutuações induzidas pelas marés, com um aumento relativo do volume de água marinha durante a maré-cheia ou de água doce durante a maré vaza, resultam em flutuações de salinidade do estuário entre, por ex., 1 ‰ e 3,2‰ (w/w) (valores intermédios entre a salinidade da água doce, ca. 0,5 ‰ e da água marinha, ca. 3,5 ‰). O aumento sazonal de água pluvial decresce os valores de salinidade. As comunidades microbianas que se desenvolvem nesses ambientes são tolerantes a estas flutuações dos parâmetros físico-químicos. Os estuários são geralmente ambientes de águas turvas e por essa razão a penetração da luz é inferior à de outros sistemas aquáticos, o que resulta numa produção primária (10 a 45 mg C/m³/dia) que nem sempre é suficiente para suportar uma população secundária. A abundância de produtores primárias varia entre os 10⁰ a 10⁷ organismos/mL de água. Apesar da baixa produtividade primária de alguns sistemas, a atividade heterotrófica é elevada (150 a 230 mg C/m³/dia), para o que muito contribui o *input* de matéria orgânica proveniente dos rios ou de lixiviação de terrenos locais.

3.2.3 *Sistemas de água salgada - Marinhos*

As águas marinhas, assim como as dos lagos, apresentam uma grande diversidade. O estudo do mar, de um modo global (físico, químico, geológico e biológico) é feito no âmbito da *oceanografia*.

Os sistemas de água salgada cobrem cerca de 70% da superfície da Terra, com um volume de 1,46 x 10⁹ km³, uma profundidade média de 4000 m (e profundidade

máxima de cerca de 11000 m). Os sistemas marinhos têm como principais características: (i) serem profundos e contínuos (sem separações físicas como aquelas existentes entre os sistemas de água doce e os ambientes terrestres); os mares e oceanos estão conectados; as principais barreiras à mobilidade dos organismos marinhos são a temperatura, salinidade e profundidade; (ii) estarem em constante circulação devido à ação do vento, gerado pelas diferenças de temperatura entre os pólos e o equador; (iii) serem dominado por marés geradas pela força de atração gravitacional da lua e sol; (iv) serem salgados, com uma concentração média salina de 35 partes de sal para 1000 partes de água (em termos de peso), ou 35 ‰ (w/w), ou 3,5% (w/w). Os principais sais são cloretos (componente maioritário), sulfatos, bicarbonatos, carbonatos, brometos de sódio, magnésio, cálcio e potássio; (v) serem pobres do ponto de vista nutritivo, tanto de nutrientes inorgânicos como de carbono orgânico, o que consiste num fator limitante e determinante da produtividade do sistema, em termos de biomassa. Não obstante, e pelo fato de os oceanos serem tão extensos, a ocorrência conjunta de fotossíntese e de produção de oxigénio corresponde a um dos principais fatores do balanço de carbono no planeta Terra, influenciando diversos aspetos desde a cadeia alimentara marinha até ao clima.

Não obstante as condições ambientais dos sistemas marinhos serem bastante uniformes, nestes podem reconhecer-se diferentes zonas (Fig. 14):

(i) *intertidal* (ou litoral), região de substrato litoral sob a ação direta das flutuações periódicas da maré: exposta ao ar durante a maré-baixa e submersa durante a maré-alta; (ii) *nerítica*, zona adjacente à intertidal, corresponde à região do relevo da plataforma continental e camada de água sobre ela, que não sofre a influências das flutuações de maré; a sua profundidade média não ultrapassa os 200 m; (iii) *pelágica* (ou oceânica), região de mar aberto que se encontra para além da plataforma continental (esta zona é ainda muitas vezes subdividida).

No eixo vertical, e em função da penetração da luz considera-se a *zona eufótica* ou *fótica* (até ca. de 200 m profundidade), na qual a luz penetra, e a *zona afótica*.

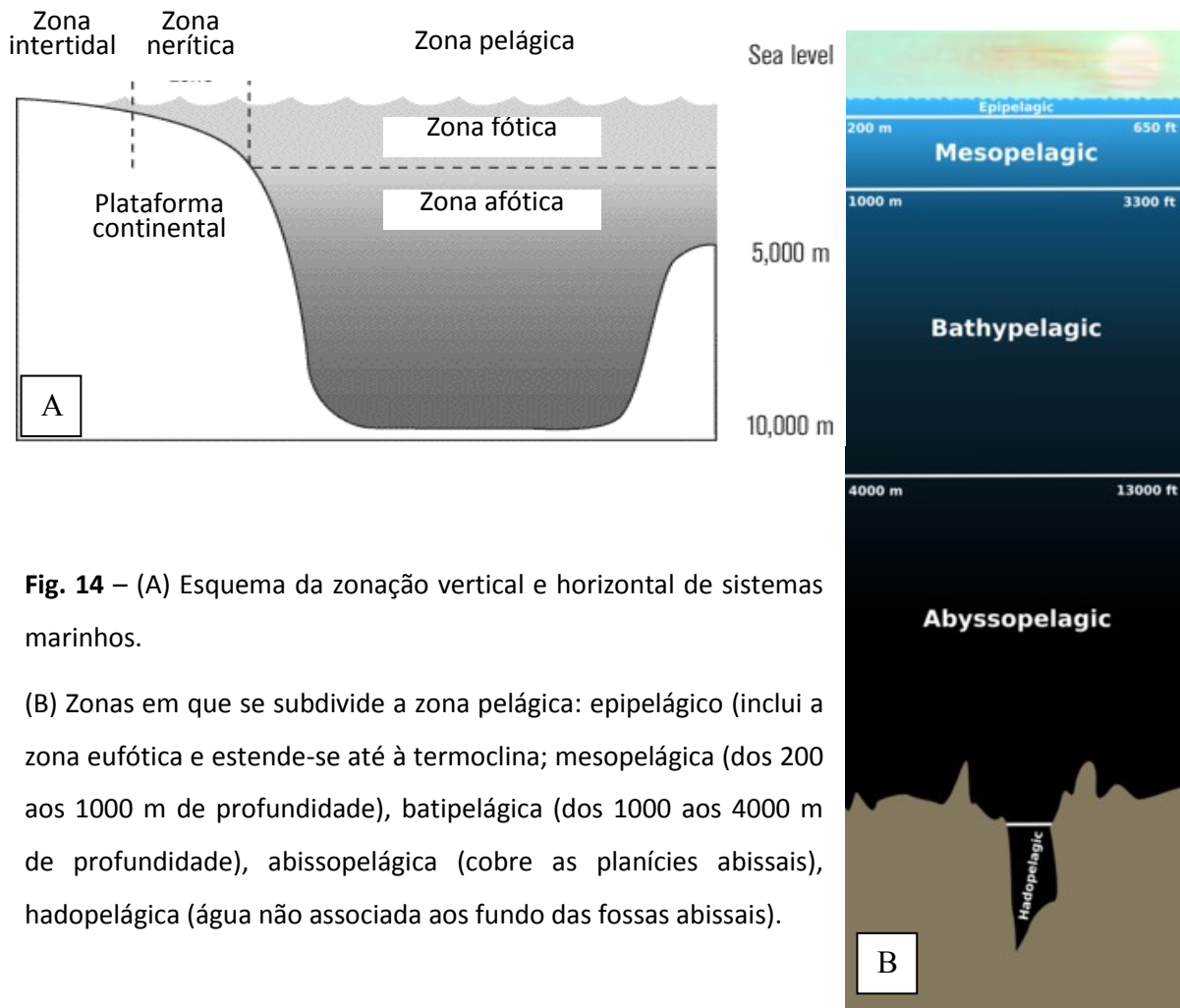


Fig. 14 – (A) Esquema da zonação vertical e horizontal de sistemas marinhos.

(B) Zonas em que se subdivide a zona pelágica: epipelágico (inclui a zona eufótica e estende-se até à termoclina; mesopelágica (dos 200 aos 1000 m de profundidade), batipelágica (dos 1000 aos 4000 m de profundidade), abissopelágica (cobre as planícies abissais), hadopelágica (água não associada aos fundo das fossas abissais).

Do ponto de vista microbiológico, podemos definir 4 *habitats* principais, e correspondentes zonas: (i) *pleuston*, (ii) *habitat pelágico*, subdividido em epipelágico (habitat da grande parte dos microrganismos fotossintéticos), mesopelágico, batipelágico, abissopelágico e região bentopelágica (região de interface com água-sedimento), (iii) *habitat epibiótico* (superfícies em que ocorrem populações aderentes a substrato), (iv) *habitat endobiótico*, que se refere aos organismos que ocorrem no interior dos tecidos de outros organismos (ex. *Epulopiscium fishelsoni*).

As comunidades microbianas predominantes em diferentes habitats são distintas. Geralmente, em mar aberto as concentrações de microrganismos são mais elevadas no pleuston (ca. 10^7 células/mL) e decrescem abaixo desta zona, sendo de 10^5 - 10^6 células/mL a ca. 100 m de profundidade. No eixo vertical, à semelhança dos lagos, a concentração de bactérias aumenta na termoclina, localizada abaixo da zona de

produção primária (cerca de 50 m). Em zonas mais profundas o número de células procariotas diminui, sendo de 10^3 - 10^5 células/mL a 1000 m de profundidade.

Nas regiões costeiras, a estratificação induzida pelo termoclina não é tão marcada, como no mar aberto, pelo facto de haver mistura de água por ação de ventos, correntes e temperatura. Deste modo, nas zonas costeiras o número de bactérias é mais ou menos uniforme ao longo da coluna de água (*i.e.* a diferentes profundidades), excepto em condições climatéricas calmas. As regiões oceânicas litorais são tipicamente mais ricas em nutrientes que as águas de mar aberto, e consequentemente sustentam populações autotróficas mais densas. Tal situação sustenta, por sua vez, populações de bactérias quimiotróficas e de animais aquáticos mais densas.

Em ambientes marinhos, em mar aberto, como na maioria dos ecossistemas, a atividade fotossintética é a grande responsável pela produtividade do sistema, e assim, pela microbiota aí existente. Esta atividade fotossintética é lavada a cabo, tanto por organismos fototróficos oxigénicos (algas eucariotas e cianobactérias), como por fototróficos anoxigénicos. Um pigmento fotossintético característico dos ambientes fóticos em mar aberto é a *proteorodopsina*, uma forma de bacteriorodopsina que foi apenas descrita no grupo das Proteobactérias.

O número de procariotas presentes em mar aberto diminui com a profundidade, como já referido. De um modo geral, nas águas mais superficiais (acima de 1000 m) predominam as espécies de *Bacteria*, e em águas mais profundas, os números de *Bacteria* e de *Archaea* são semelhantes. As espécies de *Archaea* encontradas em profundidade são quase exclusivamente pertencentes ao filo *Crenarchaeota* que também inclui as hipertermofílicas.

Por diversas razões que se prendem com as características fisiológicas dos procariotas presentes nestes ambientes e com limitações metodológicas, não é possível isolar e crescer a maior parte destes microrganismos. A sua existência e biodiversidade apenas se conhece com base nos estudos moleculares de ácidos nucleicos e outros (ex. proteínas ou moléculas específicas).

Outros componentes importantes das comunidades de microrganismos marinhos são os fungos, os protozoários e os vírus, como parasitas e predadores. Os protozoários

são predadores de bactérias e os bacteriófagos afetam as comunidades bacterianas infectando os seus hóspedes bacterianos, e os fungos predam ou parasitam bactérias, algas, assim como plantas e animais.

O aumento da população humana e do desenvolvimento urbano nas zonas costeiras está a começar a trazer problemas aos sistemas marinhos, que até há algum tempo se pensava ser inesgotável na sua capacidade de absorver e degradar poluentes.

Blooms de algas são fenómenos que envolvem o fitoplâncton de água marinhas, quando se verificam condições eutróficas, acompanhadas geralmente de temperaturas elevadas e condições climáticas calmas e soalheiras. Nestas condições, algumas algas e cianobactérias apresentam um crescimento rápido, acompanhado por odor desagradável, formação de espuma e, por vezes produção de toxinas potentes. Um exemplo destes fenómenos é as marés vermelhas, formadas pelo crescimento de dinoflagelados com pigmentação vermelha. As toxinas produzidas por estes dinoflagelados causam mortalidade extensa nas populações de peixes e podem ainda afetar aves e mamíferos marinhos, e ainda o homem, se consumir os peixes afetados.

3.2.4 Sistemas de água subterrânea

Os sistemas de água subterrânea são encontrados no interior da terra, e incluem aquíferos superficiais, intermédios e profundos. Os microrganismos são os únicos habitantes destes ambientes, sendo as bactérias as suas componentes predominantes. De um modo geral, e devido às baixas concentrações de nutrientes, a atividade microbiana é baixa. Para além disso, e ao contrário de outros sistemas aquáticos (que possuem consideráveis populações planctónicas) a maior parte desses microrganismos encontra-se em comunidades aderentes a superfícies sólidas ou, transitoriamente, em suspensão.

Aquíferos são as zonas de solo abaixo da zona de aeração (ou zona vadosa), compostos de materiais de origem rochosa, porosos, que se encontram saturados de água (fig. 15). Os *aquíferos superficiais* são os mais estreitamente conetados com a superfície terrena, sendo alimentados por águas pluviais, e alimentam, por sua vez, as nascentes que vão integrar os cursos de água. A velocidade do fluxo de água nos aquíferos

superficiais é elevada, o que os torna aeróbios. Os *aquíferos intermédios*, situados até cerca de 300 m de profundidade no solo têm uma velocidade de fluxo muito inferior àquela dos aquíferos superficiais; são estes aquíferos que fornecem a maior fração de água potável e para irrigação. Os *aquíferos profundos* localizados a uma profundidade superior aos 300 m têm velocidades de fluxo muito baixas e são anaeróbios. Não são diretamente recarregados ou afetados pelas águas pluviais.

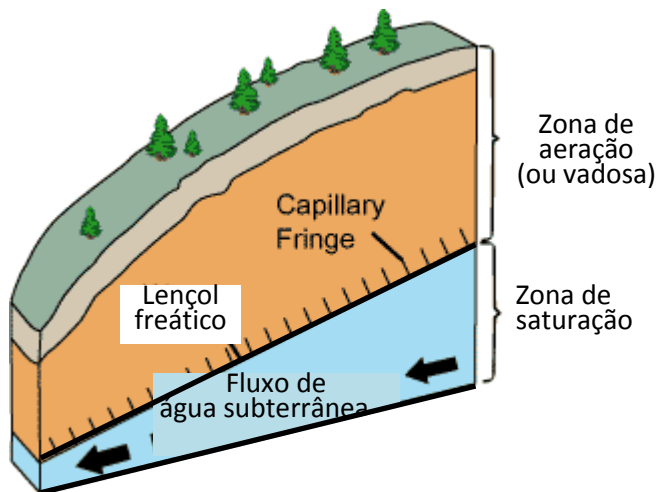


Fig. 15 - Secção transversal de um perfil de solo, evidenciando a zona vadose, zona de saturação e as águas subterrâneas.

A informação relativa à microbiologia de ambientes sub-superficiais é ainda muito incipiente, comparativamente com a microbiologia de sistemas superficiais. Zonas sub-superficiais com taxa de recarregamento de água elevado, têm números elevados de microrganismos. A maioria destes são bactérias, embora também fungos e protozoários se encontrem presentes. Em qualquer dos casos, os números são inferiores aos detetados em sistemas de água superficial (ex. 10^5 - 10^7 bactérias/g de sedimento), devido às baixas concentrações de nutrientes orgânicos.

Nos aquíferos superficiais as comunidades microbianas existentes são dominadas por populações de bactérias aeróbias heterotróficas, encontrando-se presentes outras populações, ex. eucariotas, em número inferior. A biodiversidade encontrada é inferior àquela encontrada nos solos de superfície.

Nos aquíferos profundos as comunidades microbianas são distintas daquelas encontradas em aquíferos superficiais, apresentada uma grande diversidade e números totais de microrganismos entre 10^6 - 10^7 bactérias/g de sedimento. O tipo de microrganismos encontrado inclui quimioheterotróficos aeróbios e anaeróbios facultativos, desnitrificantes, metanogénicos, redutores de sulfato, oxidantes de enxofre e fixadores de N_2 . Cianobactérias unicelulares, fungos e protozoários têm sido também encontrados nalgumas amostras. Grupos específicos de bactérias presentes nestes ambientes têm feito uso dos métodos de deteção de ácidos nucleicos.

4. Microbiologia do solo

O solo define-se como a massa pouco consistente de materiais que cobre os ambientes emersos da Terra, entre a litosfera e a atmosfera. O solo constitui o principal habitat terrestre de microrganismos, e apesar de poderem variar nas suas características, desde os solos de florestas tropicais aos desérticos, todos albergam uma biodiversidade microbiana rica.

Cada uma das zonas de solo – solos de superfície, zona vadosa e zona saturada (Fig. 15) – é um meio poroso, e como tal, formada por uma combinação de três fases: sólida (fase mineral inorgânica geralmente associada com compostos orgânicos), líquida (ou solução) e gasosa (ou atmosfera). As propriedades de cada um destes sistemas dependem da composição específica de cada fase.

Os solos são o produto final da decomposição da rocha-mãe, e as suas características dependem de (i) *material de composição da rocha-mãe* (sedimentar, vulcânica ou ígnea), (ii) *topografia*, (iii) *clima* (temperatura, pluviosidade, vento e humidade), (iv) *tempo* (i.e. período de tempo desde o início da diferenciação de horizontes) e (v) *biosfera* (plantas, animais, microrganismos).

Durante o processo de formação do solo, diversas camadas ou *horizontes* de solo são formadas. Assim, quando fazemos um corte vertical de uma sua secção obtemos um *perfil de solo*, em que é possível identificar as camadas, a que chamamos *horizontes*, de características distintas (Fig. 16). Um horizonte de solo pode definir-se como uma

camada que é aproximadamente paralela à camada superficial do solo, e que se diferencia das camadas que lhe são adjacentes do ponto de vista físico-químico e biológico. São atualmente reconhecidos 5 horizontes de solo, e classificados em **O**, **A**, **B**, **C** e **R**. Nem sempre todos os horizontes de solo estão presentes nos perfis de solo.

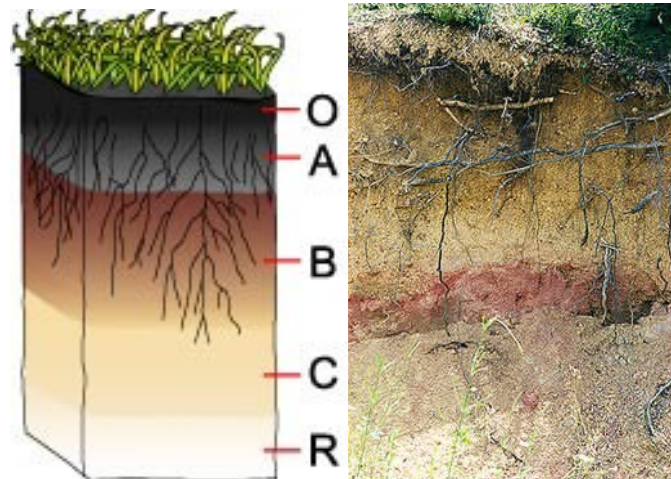


Fig. 16 – Diagrama e foto de perfil de solo, evidenciando os seus principais horizontes.

Cada um dos horizontes de solo pode apresentar sub-horizontes em função da fase de desenvolvimento do solo.

Horizontes O. São os horizontes orgânicos que se formam em cima da matriz mineral superficial, compostos essencialmente por matéria orgânica em decomposição. Os horizontes O são tipicamente bem desenvolvidos em florestas e praticamente ausentes nas pradarias. Subdividem-se nas camadas:

O₁, a mais superficial, composta por matérias orgânicas (folhas, ramos, animais) que ainda não sofreram degradação;

O₂, localizada logo abaixo da O₁; é uma camada em que se iniciaram processos de degradação.

Horizontes A. Horizontes minerais que se formam na superfície do solo ou na sua camada adjacente; são ricos em matéria orgânica e/ou evidenciam perda de sais dissolvidos (lixiviação), argila, ferros ou alumínio, sendo ricos em sílica ou outros minerais resistentes. Subdividem-se nas camadas:

A₁, caracterizada por uma cor escura e grande riqueza de matéria orgânica. A matéria orgânica aqui existente mistura-se com a mineral formando o que se designa por *húmus*, razão pela qual esta sub-camada é também designada por *húmica*. É uma camada mais estreita em solos de florestas do que em solos de pradarias.

A₂, de cor mais clara que A₁, tem um teor de matéria orgânica menor e um teor de matéria mineral maior do que A₁. Em áreas de pluviosidade elevada, os elementos minerais e compostos orgânicos são perdidos rapidamente, resultando na característica cor clara. Esta zona é, assim, também designada *zona podzólica ou eluvial*.

Horizontes B. É a camada que se localiza logo abaixo do horizonte A e pode ser subdividido em B₁, B₂ e B₃ em função do seu estágio de desenvolvimento. O horizonte B é de cor escura e textura grossa devido à presença de compostos orgânicos com argila rica em sílica, óxidos hidratados de alumínio, ferro, etc. Pelo facto de ser a camada de solo na qual se acumulam os compostos químicos provenientes da camada A₂, é por vezes designada *zona iluvial*. É uma zona pouco desenvolvida em solos de clima seco.

Horizontes B são horizontes minerais que se formam abaixo da superfície em que um ou mais das seguintes características podem estar presentes: (i) enriquecimento com argila lixiviada proveniente das camadas superiores, ferro, alumínio, manganésio ou matéria orgânica, (ii) enriquecimento residual com argilas de silicato ou sesquióxidos que não envolve a remoção de carbonatos ou sais solúveis; (iii) partículas minerais ligadas a sesquióxidos, que são responsáveis por uma cor mais intensa do que os horizontes que lhe são adjacentes; (iv) alteração do material da rocha original que origina argilas ou óxidos de silicato em condições em que as anteriores características não ocorrem.

Horizonte C. Zona constituída pela camada mineral, localizada abaixo do horizonte B e acima da rocha-mãe, consistindo de largas massas de rocha cujo processo de degradação se encontra muito incompleto. Não possui nenhuma das características das camadas A ou B.

Horizonte R. Camada de solo que consiste da rocha-mãe, em que não há processos de degradação visíveis.

As diferenças entre os diversos locais “solos” dependem da combinação dos componentes minerais e biológicos desses sistemas porosos, o que por sua vez depende da geologia, topografia e clima de cada local. As particularidades de cada local refletem-se nos números e atividades microbianas presentes em cada um deles. Nas secções seguintes consideram-se as três zonas de solo no que concerne a sua microbiologia.

4.1 Comunidades microbianas em solos de superfície

Os solos de superfície compreendem geralmente os horizontes superficiais O, A e B.

O solo é geralmente um bom ambiente para o crescimento de microrganismos, sendo observável o desenvolvimento de colónias na superfície das partículas de solo. Os microrganismos encontrados no solo incluem vírus, bactérias, fungos, algas e protozoários, e os seus números são geralmente superiores àqueles encontrados em ambientes aquáticos. Os números de microrganismos cultiváveis podem atingir as 10^8 células/g de solo seco, sendo o seu número total (por contagens diretas ao microscópio) obviamente superior. As concentrações de matéria orgânica no solo são relativamente elevadas, o que favorece o crescimento de microrganismos heterotróficos (os microrganismos representam um percentagem muito baixa *ca.* 0,001% do carbono orgânico total presente no solo).

Em geral as colónias de microrganismos distribuem-se de modo não-uniforme na superfície das partículas de solo.

O componente mineral (fonte de micronutrientes), resultante dos processos de degradação, e a matéria orgânica (fonte de C e N) são duas das principais diferenças entre solos de superfície e de sub-superfície, do ponto de vista dos requisitos para o crescimento de microrganismos. Estas diferenças no conteúdo nutritivo dos solos refletem-se na abundância, na distribuição (uniforme ou não-uniforme) e na atividade dos microrganismos no solo.

A distribuição de microrganismos no solo também depende da textura e estrutura do solo (Fig. 17). Relativamente a estes fatores, o espaço ocupado pelos poros nos

agregados de solo é um fator importante, na medida em que contribui para o controlo do conteúdo hídrico no solo. A maior parte do microrganismos do solo encontra-se adsorvido a superfícies sólidas, e uma pequena fração encontra-se livre. Os exopolímeros produzidos pelos microrganismos contribuem para a formação dos agregados de solo, devido às suas características adesivas.

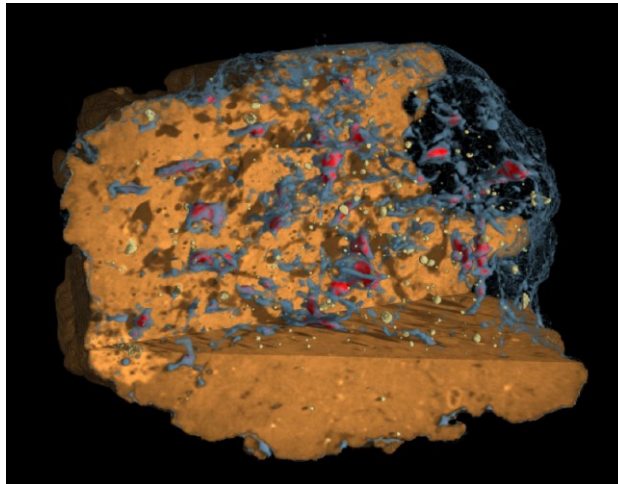


Fig. 17 – Representação tridimensional de um agregado de solo (diâmetro 10 mm) como poros de dimensão maior que 0,01 mm. Os poros vermelhos são preenchidos de ar e os poros azuis são preenchidos por água (simulação com um potencial hídrico de 30 hPa). Os grãos de quartzo aparecem representados a amarelo (http://www.spp1315.uni-jena.de/spp1315/project_vogel.html).

Os solos de superfície albergam populações de bactérias (incluindo actinomicetos), fungos e protozoários. Para além destes, os vírus patogénicos destes microrganismos também estão presentes. As **bactérias** são invariavelmente os microrganismos encontrados em maior número e com maior biodiversidade, tendo sido estimado um número de espécies bacterianas superior a 10.000. O número de bactérias cultivável varia entre 10^7 e 10^8 células/g solo e o número total (incluindo viáveis e não viáveis) pode exceder 10^{10} células/g solo. A abundância de bactérias anaeróbicas aumenta em profundidade, para cada zona de solo. O grupo dos *actinomicetos* é um componente importante da microbiota, especialmente em condições de pH elevado, temperatura elevada ou stress hídrico. Os actinomicetos são os únicos microrganismos capazes de utilizar a quitina, a celulose e a hemicelulose presentes no solo.

Bactérias indígenas do solo podem ser classificadas com base nas suas características de crescimento e afinidade para os substratos de carbono em duas categorias: (i) *autóctones* ou *K-selecionadas*, que metabolizam devagar no solo, utilizando como

substrato, a matéria orgânica do solo libertada devagar, e (ii) *zimógenos ou r-selecionados* que estão adaptados a uma existência com períodos de rápido crescimento intercalados com períodos de dormência, dependendo da existência, ou não, de substrato. Os géneros de bactérias que dominam as comunidades presentes em solos superficiais e que são importantes em microbiologia ambiental encontram-se listados nas Tabelas 3 a 5.

Os **fungos** (com a exceção das leveduras) são aeróbios e abundantes na maioria dos solos de superfície. Os seus números variam entre 10^5 e 10^6 /g de solo. Apesar de estarem presentes em número inferior ao das bactérias, os fungos contribuem geralmente com uma maior proporção para o total de biomassa microbiana do solo (Tabela 6), o que se deve à sua maior dimensão celular (hifas de 2 a 10 μm diâmetro) relativamente a outras formas microbianas. As leveduras crescem de modo anaeróbio (fermentação) e são menos numerosas (até 10^3 /g de solo) do que fungos aeróbios formadores de micélio. Os fungos são mais abundantes nos horizontes O e A. São encontrados em associação com a rizosfera, mas também com solos sem rizosfera.

Os fungos são importantes componentes do solo em particular no que se refere à sua participação nos ciclos de nutrientes, e na decomposição da matéria orgânica, tanto de açúcares simples como polímeros complexos, como a celulose e a lenhina. O seu papel nos processos de decomposição é de maior importância em condições de pH ácido, dado os fungos serem mais tolerantes à acidez do que as bactérias. Os fungos são também importantes para o desenvolvimento da estrutura do solo, na medida em que as suas hifas envolvem fisicamente as partículas de solo. Diversas espécies fúngicas parasitam raízes de plantas e algumas outras influenciam o crescimento das plantas através de associações micorrízicas com as suas raízes.

Tabela 3. Características das bactérias, actinomicetos, e fungos de solos de superfície (adaptado de Sharma 2005).

<i>Caraterísticas</i>	<i>Bacteria</i>	<i>Actinomycetes</i>	<i>Fungi</i>
População	Muito numerosas	Intermédias	Menos numerosas
Biomassa	Bactéria e actinomicetos	Têm biomassa semelhante	Biomassa maior
Grau de ramificação	Baixo	Filamentosos, mas alguns fragmentam-se em células individuais	Extensas formas filamentosas
Micélio aéreo	Ausente	Presentes	Presentes
Crescimento em cultura líquida	Túrbido	Pellets	Pellets
Crescimento	Exponencial	Cúbico	Cúbico
Parede celular	Mureína, ácido teicoico e lipopolissacárido	Como nas bactérias	Quitina ou celulose
Corpos de frutificação	Ausentes	Simples	Complexos
Competitividade para comp.orgânicos simples	Muito competitivo	O menos competitivo	Intermédios
Fixação de azoto	Sim	Sim	Não
Relação com o oxigénio	Aeróbio, anaeróbio	Principalmente aeróbio	Aeróbio, excepto as leveduras
Stress hídrico	O menos tolerante	Intermédio	Muito tolerante
pH óptimo	6-8	6-8	6-8
pH competitivo	6-8	> 8	< 5
Competitividade no solo	Todos os solos	Domina em solos secos de pH elevado	Domina em solos de pH baixo

Tabela 4. Culturas bacterianas dominantes em solos de superfície (adaptado de Sharma 2005).

<i>Organismo</i>	<i>Caraterísticas</i>	<i>Funções</i>
<i>Arthrobacter</i>	Heterotróficos, aeróbios, Gram positivos ou negativos. Até 4 % das bactérias cultiváveis do solo.	Ciclo de nutrientes e biodegradação
<i>Streptomyces</i>	Actinomicetos Gram-positivos, heterotróficos, aeróbios. 5 a 20% das bactérias cultiváveis do solo.	Ciclo de nutrientes e biodegradação, produção de antibiótico por <i>Streptomyces scabies</i> .
<i>Pseudomonas</i>	Gram-negativos, heterotróficos, aeróbios ou anaeróbios facultativos. Possuem grande diversidade de sistemas enzimáticos. 10 a 20% das bactérias cultiváveis do solo.	Ciclo de nutrientes e biodegradação, incluindo compostos orgânicos recalcitrantes; agente de biocontrolo.
<i>Bacillus</i>	Gram-positivos, heterotróficos, aeróbios. Produzem endósporos. 2 a 10% das bactérias cultiváveis do solo.	Ciclo de nutrientes e biodegradação, agente de biocontrolo (<i>Bacillus thuringiensis</i>).

Tabela 5. Exemplos de bactérias heterotróficas importantes em solos de superfície (adaptado de Sharma 2005).

<i>Organismo</i>	<i>Caraterísticas</i>	<i>Funções</i>
<i>Actinomyces (Streptomyces)</i>	Gram-positivo, aeróbio, filamentoso	Produção de geosmina, responsável pelo “odor a terra”, e antibióticos
<i>Bacillus</i>	Gram-positivo, aeróbio, formador de esporos	Ciclo do carbono, produção de inseticidas e antibióticos
<i>Clostridium</i>	Gram-negativo, anaeróbio, formador de esporos	Ciclo do carbono (fermentação), produção de toxinas
Metanotróficos (<i>Methylosinus</i>)	Aeróbio	Oxidantes de metano que co-metabolizam tricloroetano (TCE) usando metano-monooxigenase
<i>Alcaligenes eutrophus</i>	Gram-negativo, aeróbio	Degradação de 2,4-D via plasmídeo pJP4
<i>Rhizobium</i>	Gram-negativo, aeróbio	Fixação de azoto em simbiose com leguminosas
<i>Frankia</i>	Gram-positivo, aeróbio	Fixação de azoto em simbiose com plantas não-leguminosas
<i>Agrobacterium</i>	Gram-negativo, aeróbio	Importante agente patogénico de plantas, causador do Galha da coroa (“ <i>Crown Gall</i> ”)

Tabela 6. Biomassa dos componentes maioritários da comunidade biológica num solo de pradaria (range aproximado) (adaptado de Sharma 2005).

<i>Componente da biota</i>	<i>Biomassa (tonelada/ha)</i>
Raízes de plantas	em geral ca. 20 (até 90)
Bactérias	1-2
Actinomicetos	0-2
Fungos	2-5
Protozoários	0-0,5
Nemátodes	0-0,2
Minhocas	0-2,5
Outros animais do solo	0-0,5
Vírus	negligenciável

Os principais microrganismos envolvidos na decomposição da matéria orgânica no solo são os fungos e as bactérias, que pelas suas atividades libertam os nutrientes, seus constituintes, possibilitando assim a sua reciclagem através dos ciclos de nutrientes. O processo de decomposição envolve a participação de grupos nutricionais e ecológicos diferentes, no que consiste uma sucessão ecológica (Fig. 18).

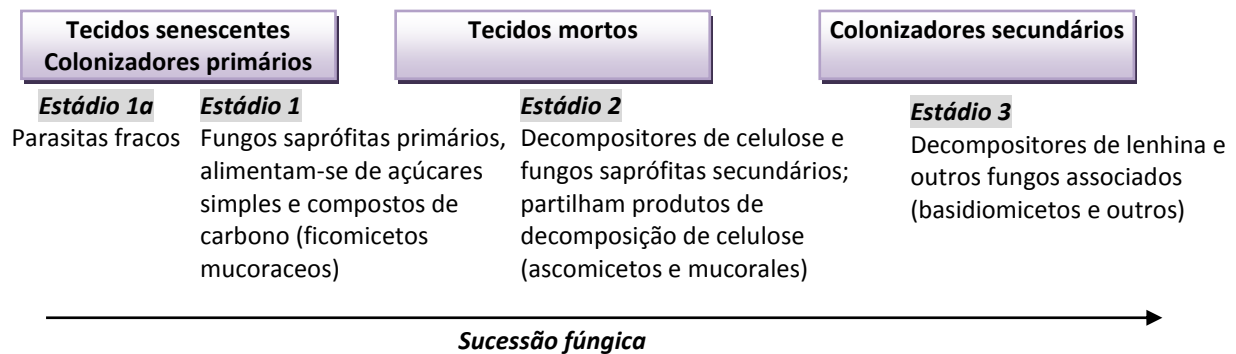


Fig. 18 – Esquema da sucessão ecológica de fungos na decomposição do material vegetal em solos. Embora as bactérias estejam envolvidas no processo, a sua participação está menos bem estabelecida que a dos fungos.

Algas. Sendo organismos fotoautotróficos predominam nas zonas superficiais do solo, em que a luz solar penetra, até cerca de 10 cm de profundidade. Os seus números variam entre 5×10^3 e 1×10^4 cel/g solo. As algas são pioneiras de áreas vulcânicas (nuas), de solos de desertos e de superfícies rochosas. Os quatro principais grupos de algas encontrado em solos são algas verdes, as Chrysophycofita (ex. *Navicula* e *Botrydiopsis*), algas vermelhas (ex. *Prophyridium*), e cianobactérias (classificadas agora como bactérias).

Protozoários. Os protozoários são células eucariotas e unicelulares, cujo comprimento pode atingir 5,5 mm, embora a maioria seja de menor dimensão (Tabela). A maior parte dos protozoários do solo é heterotrófica, alimentando-se de bactérias, leveduras, fungos e algas. Os protozoários no solo encontram-se nos 15 a 20 cm superficiais do solo e concentram-se, de um modo geral, em torno das raízes das plantas, onde se encontra concentrado o seu alimento.

Representantes dos três principais grupos – amibas, ciliados e flagelados – são encontrados no solo, sendo as formas de amibas as mais numerosas. Em termos globais, os protozoários são referenciados como presentes no solo em números que variam entre os 3×10^4 cel/ g solo não agrícola, os $3,5 \times 10^5$ cel/ g de solo de cultivo de milho e os $1,6 \times 10^6$ cel/ g de solo em zonas sub-tropicais.

Tabela 7. Dimensão média de protozoários do solo e bactérias (adaptado de Sharma 2005).

Grupo	Comprimento (μm)	Volume (μm^3)
Bacteria	> 1-5	2,5
Flagelados	2-50	50
Amibas nuas	2-600	40
Ciliados	50-1500	3000

Papel dos microrganismos em solos de superfície

Os microrganismos presentes em solos de superfície estão envolvidos em diversos processos vitais, incluindo a gestão da qualidade da deterioração ambiental. Algumas das atividades mais importantes em que estão envolvido são:

(i) **Formação do solo.** Para a formação do solo contribuem processos químicos, físicos e microbiológicos. Os microrganismos, como os fungos e as bactérias (incluindo os actinomicetos) têm um papel vital na formação do húmus, através das suas atividades de decomposição da matéria animal e vegetal. Os microrganismos participam também na formação e estabilização dos agregados do solo e na estrutura do solo. As partículas de solo são “ligadas” por microrganismos filamentosos que crescem sobre a superfície das partículas adjacentes de solo formando uma rede extensa de hifas que interconetam as partículas de solo envolvidas. Os microrganismos do solo também causam a re-orientação das partículas de argila sobre a superfície da célula microbiana, o que resulta na compactação dessas partículas e ajuda à formação dos agregados de solo. A formação de agregados também é auxiliada pelos exopolímeros produzidos tanto por microrganismos como pelas raízes das plantas.

(ii) **Ciclos de nutrientes.** Na natureza, o equilíbrio entre a absorção dos diferentes nutrientes e o seu retorno para o ambiente é mantida através dos *ciclos biogeoquímicos de nutrientes*, que envolvem diferentes grupos metabólicos de microrganismos. Por exemplo, o equilíbrio entre a fixação de carbono e a produção de oxigénio, por um lado, e o consumo de compostos de carbono e de oxigénio, por outro, é mantido através do ciclo biogeoquímico do carbono (Fig. 19). Assim como o carbono, os outros elementos – oxigénio, azoto, enxofre, fósforo, e ferro - também são reciclados nos diferentes ciclos biogeoquímicos (Figs. 20 a 22).

Do ponto de vista da microbiologia ambiental os ciclos biogeoquímicos, que tanto dependem da atividade microbiana, são também de enorme importância económica,

sendo muito relevantes para processos como a biorremediação, a agricultura sustentável, a indústria mineira ou a gestão de resíduos municipais.

(iii) Biorremediação. A biorremediação é definida com qualquer processo que utiliza microrganismos, plantas verdes ou os seus enzima, para degradar substâncias poluentes (compostos orgânicos, metais pesados, etc.) indevidamente presentes no meio ambiente. Estruturalmente, muitos dos poluentes orgânicos “derramados”, de modo inadequado, no ambiente são semelhantes a compostos existentes na natureza. O sucesso de qualquer processo de biorremediação depende do tipo de solo, da comunidade microbiana indígena, das condições ambientais, assim como do tipo e quantidade do poluente.

(iv) Gestão de resíduos. A gestão de resíduos nos tempos antigos era um processo simples, quer para resíduos líquidos (ex. despejo em lagos, cursos de água ou mar), quer para resíduos sólidos (pequenos aterros). Contudo, com o aumento da população humana e a sua localização em grandes centros urbanos, tornou-se necessário alterar estes processos de modo a tornar a sua gestão sustentável.

Os processos atualmente utilizados para tratamento de resíduos, como os aterros sanitários, os sistemas de compostagem, ou digestão anaeróbia utilizam microrganismos cujas atividades são essenciais para um processo de tratamento de resíduos bem sucedido.

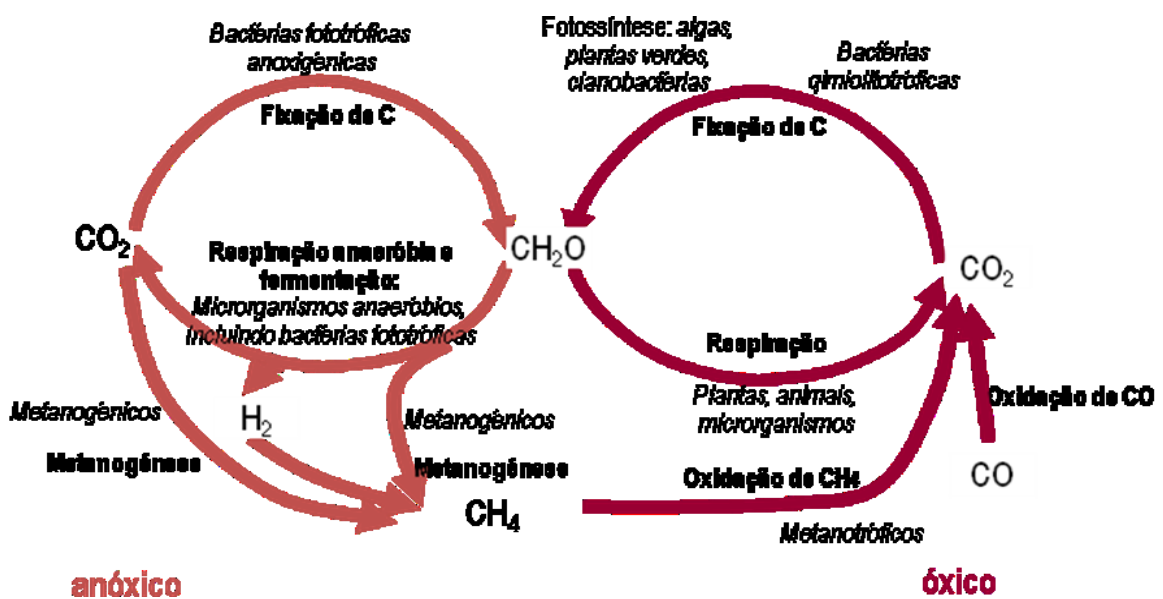


Fig. 19 - Ciclo biogeoquímico do carbono, evidenciando o papel dos microrganismos e as condições em que as suas atividades se processam.

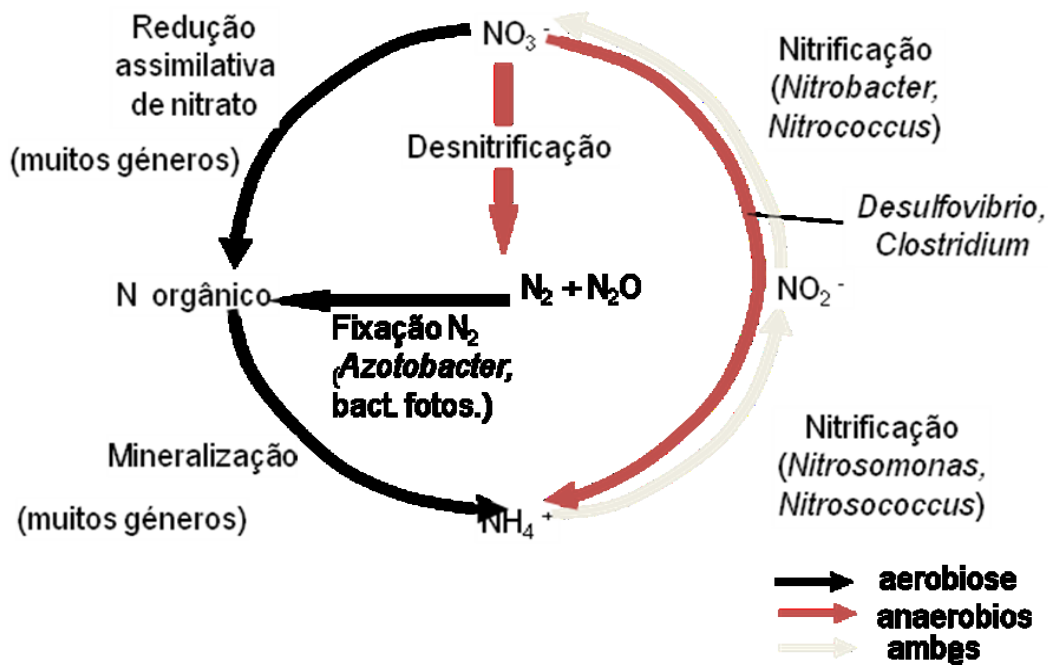


Fig. 20 - Ciclo biogeoquímico do azoto, evidenciando o papel dos microrganismos e as condições em que as suas atividades se processam.

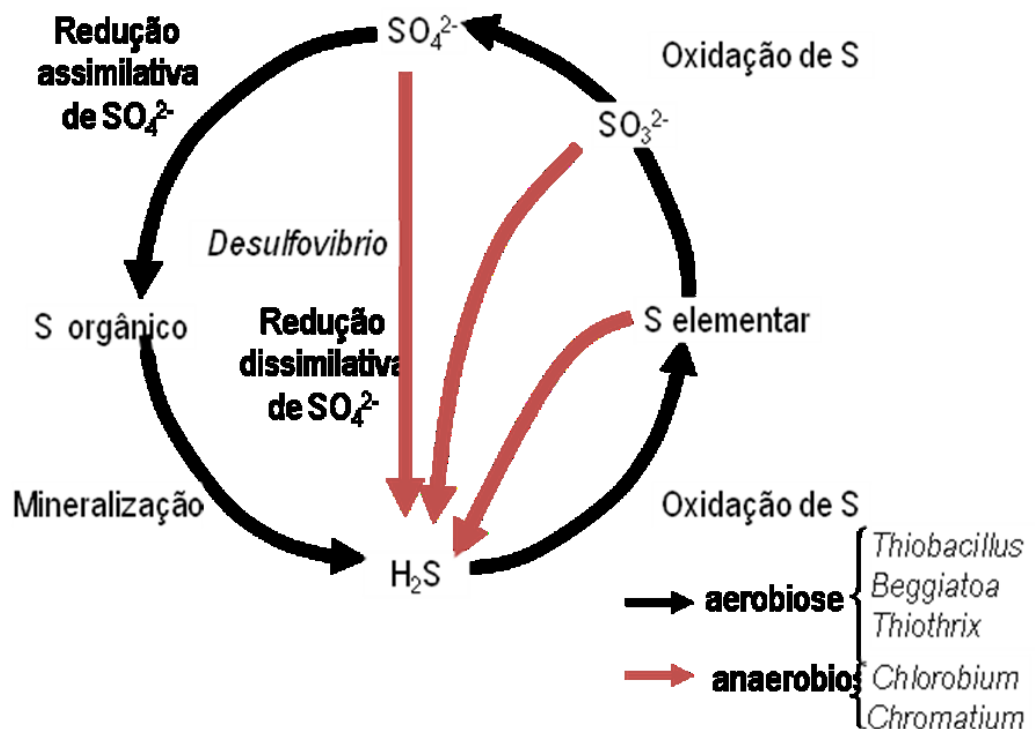


Fig. 21 - Ciclo biogeoquímico do enxofre, evidenciando o papel dos microrganismos e as condições em que as suas atividades se processam.

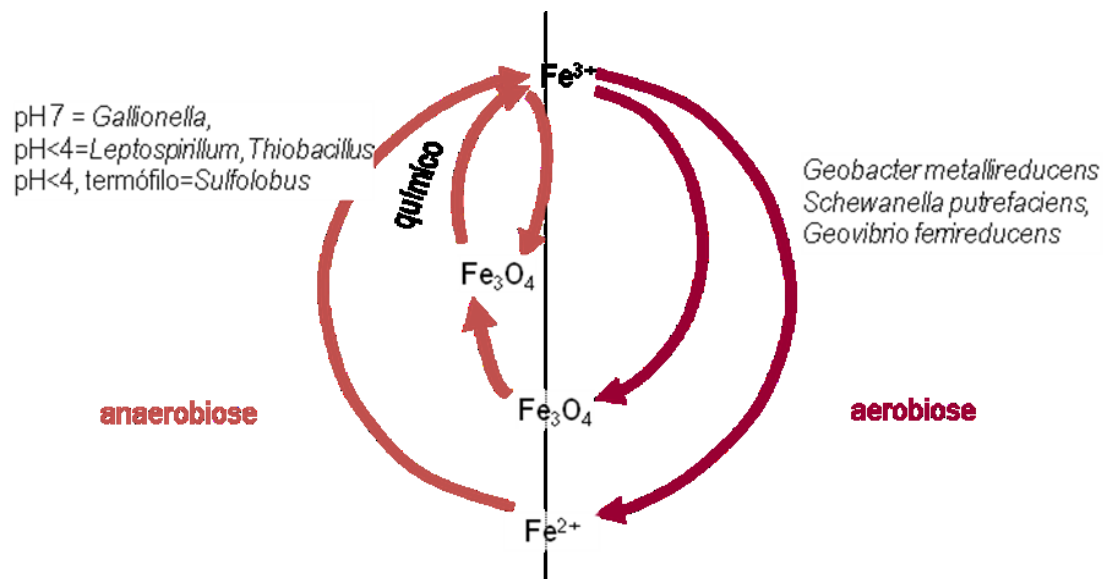


Fig. 22 - Ciclo biogeoquímico do ferro, evidenciando o papel dos microrganismos e as condições em que as suas atividades se processam.

4.2 Atividade microbiana na zona vadosa

A zona vadosa pode ser definida como o ambiente oligotrófico insaturado que se localiza entre o solo de superfície e a zona saturada. Esta zona é constituída principalmente por materiais da rocha-mãe não degradados, e tem um conteúdo de material orgânico muito baixo (geralmente < 0,1 %), o que a torna nutritivamente muito limitada em termos de carbono e micronutrientes. A zona vadosa é pouco espessa em habitats perto da superfície ou mesmo ausente, como no caso dos solos de zonas húmidas, e pode ser espessa (até centenas de metros) em vários ambientes áridos ou semi-áridos. Esta região é de interesse microbiológico (em particular no âmbito da microbiologia ambiental) pois os poluentes originados nos ambientes de superfície atravessam-na antes de atingir as águas subterrâneas (aquíferos) e poderá vir a ser de importância, futuramente, alterar ou restringir o movimento destes poluentes para a água subterrânea e para os reservatórios de água potável.

Os ambientes profundos, de subsuperfície, tanto insaturados como saturados, eram tido até recentemente como ambientes com pouca ou nenhuma vida microbiológica.

O aumento de interesse, do ponto de vista microbiológico, nos ambientes de subsuperfície deveu-se primeiramente ao desenvolvimento da indústria petrolífera (a partir da década de 1920). A análise da água extraída dos campos de produção de petróleo revelou a presença de sulfureto de hidrogénio e bicarbonatos de origem microbiológica, o que se deve, sabe-se agora, à presença de bactérias sulfato-redutoras.

Uma diversidade de estudos efetuados, desde então, em amostras de zonas insaturadas vadosas do solo, incluindo ambientes semi-áridos de deserto (até 70 m de profundidade) possibilitaram entender melhor a complexidade da comunidade microbiana aí existente. Assim, verifica-se uma diminuição da abundância relativa de bactérias em profundidade (Tabela 7). A maioria dos organismos isolados de zonas profundas são Gram-positivos e anaeróbios obrigatórios, enquanto que em solos de superfície os organismos são Gram-negativos aparecem em número superior. Adicionalmente, os estudos efetuados indicam que as atividades microbianas em solos de profundidade apresentam taxas metabólicas inferiores às dos solos de superfície. Contudo, o conhecimento atual sobre as zonas profundas da vadose é ainda parco.

Tabela 7. Números de bactérias em solos de superfície, e insaturados de sub-superfície (70 m profundidade) (adaptado de Sharma, 2005)

<i>Local da amostra</i>	<i>Contagens diretas (nº cel. /g)</i>	<i>Contagens de viabilidade (UFC /g)</i>
Superfície (10 cm)	$2,6 \times 10^6$	$3,5 \times 10^5$
Subsuperfície, interface sedimento-basalto (70,1 m)	$4,8 \times 10^5$	50
Subsuperfície, camada de basalto (70,4 m)	$1,4 \times 10^5$	21

4.3 Atividade microbiana na zona saturada (ou aquíferos subterrâneos)

Esta zona ocorre por baixo da zona vadosa e mantêm-se saturada com água. As características deste ambiente e suas comunidades microbianas já foram abordadas na secção relativa aos sistemas de águas subterrâneas (3.2.4).

5. Microbiologia em ambientes extremófilos

Os microrganismos são ubíquos na natureza, podendo ser encontrados em todo o tipo de habitats, caracterizados pelas mais diversas condições. *Ambientes extremófilos* são aqueles caracterizados por condições de pH, temperatura, pressão, salinidade, nutritivas, de radiação, etc. que são demasiado elevadas ou demasiado baixas para a grande maioria das formas de vida, para as quais são tóxicas ou inibitórias. Exemplos de ambientes extremófilos são as zonas termais tanto de superfície como dos fundos marinhos, os gelos da Antártida, os lagos salinos, os solos desérticos da antártica, ou as zonas de exploração de minério. As formas de vida que vivem e se multiplicam nesses ambientes extremófilos são designadas *extremófilas* (Lat. *extremus*, extremo + Gr. *philia*, amor) e não toleram apenas, mas necessitam dessas condições particulares, extremas para viver.

Não obstante a imensa plasticidade da vida e sua adaptação a todo o tipo de condições existentes na Terra, as condições extremas, características de ambientes extremófilos, restringem o leque de espécies que nele se desenvolvem, e são assim caracterizados por uma relativamente baixa biodiversidade. Muitos dos microrganismos que habitam os ambientes extremófilos possuem características fisiológicas, adaptativas e especializadas, que lhes permitem sobreviver e desenvolver-se nestas condições (como já referido anteriormente; UT2), como as características estruturais e fisiológicas das suas membranas celulares e enzimas específicos.

Condições extremófilas podem ocorrer temporariamente ou de um modo mais permanente em qualquer tipo de ambiente aquático, do solo ou aéreo. Frequentemente várias condições extremas se conjugam nos ambientes extremófilos. Serão analisados, em seguida, alguns destes ambientes extremófilos.

Interface água-ar. A interface água-ar é um ambiente particular, muitas vezes considerado de características extremófilas pelo facto de ser caracterizado por níveis de radiação solar elevados, acumulação de compostos tóxicos (metais pesados, pesticidas), grandes flutuações de temperatura, pH e salinidade, e ainda competição. Esta interface, conhecida por *pleuston*, é caracterizada por possuir um número de microrganismos superior às restantes camadas da coluna de água. O pleuston acumula

nutrientes e outras moléculas orgânicas e inorgânicas que formam um filme à superfície. Esta acumulação de nutrientes atrai os microrganismos. Para além dos nutrientes, outros compostos de natureza tóxica, como pesticidas (DDT), hidrocarbonetos de petróleo, e metais pesados (Cd, Cu, Mn, Hg, Pb, Se, Cr) também se acumulam na interface água-ar. Deste modo, os microrganismos encontrados desenvolveram adaptações fisiológicas particulares que lhes permitem viver nestes ambientes e que incluem vias que degradam compostos tóxicos e que lhes garantem resistência aos metais pesados. Alguns microrganismos desenvolveram também mecanismos de reparação de DNA.

Ambientes termófilos e hipertermófilos. Ambientes termófilos (> 70 °C) encontram-se em diversos locais do planeta e incluem as fontes termais terrestres e submarinas, algumas das quais atingem 100 °C, e as fontes hidrotermais (ex. fumarolas negras) cuja temperatura pode ultrapassar 300 °C. Estas condições são inadequadas para a maior parte das formas de vida e apenas algumas eubactérias e arqueobactérias se sabe existirem nesses habitats. Nestes locais, e para além das temperaturas elevadas, o crescimento é ainda limitado por baixa concentração de compostos orgânicos e de oxigénio, e por vezes por valores de pH ácido ou alcalino. A água que flui nestes aquíferos, apresenta um gradiente de temperatura que se reflete numa zonação de comunidades de microrganismos ao longo do gradiente. A temperaturas superiores a 75 °C apenas algumas espécies bacterianas do género *Thermus* têm sido detetadas. *Bacillus stearothermophilus* é um microrganismo dominante em fontes termais com temperatura entre 55 e 70 °C, apesar de muitos outros microrganismos, como cianobactérias e algas, ocorrerem nos mesmos locais.

As fumarolas negras localizam-se a profundidades entre 800 e 1000 m. Estas regiões não recebem qualquer luz solar ou fonte de carbono orgânico das águas superficiais, no entanto as comunidades bióticas que aí se desenvolvem são complexas e incluem anfípodos, copépodes, vermes-tubulares, caracóis, camarões, caranguejos, peixes e polvos. Como são estas comunidades sustentadas do ponto de vista energético? As cadeias alimentares perto das fontes hidrotermais dependem da produção primária de microrganismos capazes da oxidação quimiolitotrófica de enxofre reduzido, levada a

cabo principalmente por microrganismos do género *Beggiatoa* e *Thiomicrospira*, e por outros microrganismos oxidantes de enxofre e sulfureto. Algumas das características que permitem a estes microrganismos viver em condições termófilas incluem (i) *proteínas que não se desnaturam a temperaturas elevadas* (ex. presença de sequências invulgares de aminoácidos que estabilizam a estrutura proteica a temperaturas elevadas), (ii) *membranas celulares termoestáveis* (possuem uma proporção de ácidos gordos ramificados, de elevado peso molecular, superior ao de outros organismos e que lhes permitem manter a semi-permeabilidade a temperaturas elevadas) e (iii) *maior estabilidade das moléculas de ácidos nucleicos a temperaturas elevadas* (contêm uma proporção de guanina e citosina no DNA superior à de outras formas celulares, o que aumenta o ponto de fusão do DNA, devido a um maior número de ligações de H na molécula de ácido nucleico), entre outros. As espécies de *Archaea*, extremófilas extremas, possuem membranas celulares muito distintas das *Eubacteria* e conferem-lhes uma ainda maior resistência a temperaturas elevadas.

Alguns dos géneros característicos destes ambientes extremos são *Thermus*, *Methanobacterium*, *Methanobrevibacter*, *Methanococcus*, *Methanogenium*, *Methanosarcina*, *Sulfolobus*, *Pyrodictium* e *Pyrococcus* (os últimos dois géneros conseguem viver acima dos 100 °C).

Existem numerosas aplicações biotecnológicas para enzimas isoladas de microrganismos termotolerantes. Uma das mais conhecidas é a Taq, a DNA polimerase termotolerante isolada de *Thermus aquaticus*, e atualmente utilizada por inúmeros laboratórios nos processos de PCR. Para além desta, diversas proteases, lipases, amilases, e xilanases são utilizadas na agricultura, na indústria do papel, indústria farmacêutica, purificação de água, biorremediação, indústria da extração de minério, e indústria petrolífera.

Ambientes hipersalinos. Os organismos halotolerantes e halofílicos extremos necessitam de sal, na forma de ião Na^+ , para o seu crescimento em concentrações superiores aos encontrados na água do mar. Os dois géneros mais conhecidos de bactérias halofílicas são *Halobacterium* e *Haloanaerobium*. Algumas algas e fungos

também têm sido descritos entre os microrganismos halofílicos. O principal mecanismo desenvolvido nestes organismos que lhes permite o crescimento em ambientes de extrema salinidade, como os do Mar Morto ou do Grande Lago no Utah, EUA, consiste no sequestro e acumulação de elevadas concentrações de um soluto de modo a equilibrar a concentração de sal externa à célula. De um modo geral o íão K^+ é utilizado em bactérias e o glicerol é utilizado em eucariotas. Para além deste mecanismo é de referir a existência de proteínas com baixa proporção de aminoácidos apolares, como outra adaptação dos microrganismos halofílicos.

Acidofílicos. Ambientes como os das nascentes quentes ácidas, trato gastrointestinal, efluentes ácidos de minas e outros locais associados com a extração de minério são habitados por microrganismos acidofílicos, como aqueles do género *Thiobacillus*. Alguns dos membros do género *Thiobacillus* são acidofílicos e são apenas capazes de crescer a valores de pH perto de 2,0. *Thiobacillus thiooxidans* desenvolve-se em condições cujo pH varia entre 1,0 e máximos de pH de 4,0 - 6,0; e o seu pH óptimo varia entre 2,0 e 2,8. Os microrganismos acidofílicos possuem adaptações fisiológicas que permitem que as suas atividades enzimáticas e transporte de membrana se processem apenas a valores de pH baixos.

Algumas espécies de *Thiobacillus* são quimiolitotróficas, e obtêm energia da oxidação de compostos de enxofre reduzido, enquanto outras, como *T. ferrooxidans* oxidam adicionalmente o ferro ferroso a férrico, também num processo quimiolitotrófico. As atividades metabólicas destes organismos, e outros semelhantes, encontradas em associação com as zonas de extração de minério, são produtoras dos efluentes ácidos provenientes das minas. As suas atividades têm também uma aplicação em processos de biorrecuperação de metais, em particular nos minérios contendo urânio, cobre e outros minérios com baixo teor do metal de interesse.

Outros exemplos de microrganismos acidofílicos são *Clostridium acetobutylicum* e *Sarcina ventriculi*, fermentadores e anaeróbios obrigatórios. Para além de bactérias, alguns fungos, algas e protozoários são acidotolerantes ou acidofílicos; em qualquer destes casos, modificações das membranas celulares permitem a sua sobrevivência sob condições de acidofilia.

Os ambientes característicos das nascentes quentes ácidas são habitados por microrganismos *termoacidófilicos* que crescem a temperaturas elevadas e valores de pH baixos

Barofílicos. O fundo dos oceanos combina condições de elevada pressão (>1000 atm) e temperaturas de 2-3 °C. Os microrganismos que aqui vivem são *barofílicos*, para além de *psicrófilos*. Vários mecanismos permitem a sua sobrevivência nestes ambientes, incluindo a elevada proporção de ácidos gordos de cadeia longa, poli-insaturada, nas suas membranas celulares, que lhes permitem manter o estado de fluidez em condições extremas de pressão e temperatura.

Oligotróficos. A água ultra-pura, sem compostos orgânicos, utilizada em semicondutores, aparelhos médicos ou em equipamentos de indústrias diversas é um exemplo de um ambiente extremo, que se designa por oligotrófico (Gr. *oligo*, pequeno + *trophe*, alimento). No entanto, e como noutros ambientes extremos, existem microrganismos capazes de aí se desenvolver, causando danos avultados. Poucos microrganismos se conhecem capazes de viver em condições de extrema oligotrofia, sendo dois exemplos o género *Caulobacter* e algumas espécies de *Pseudomonas* (ex. *P. fluorescens* ou *P. aeruginosa*).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Atlas, R.M. e Bartha, R. 1993. *Microbial Ecology, Fundamentals and Applications*, 3rd Ed., The Benjamin / Cummings Pub Co., Inc.

Madigan, M.T., Martinko, J.M. e Parker, J. 2004. *Microbiologia de Brock* 10 edição, Prentice Hall.

Sharma, P.D. 2005. *Environmental Microbiology*. Alpha Science International Lda. Harrow UK.

Exercício para micro do solo

<http://www.microbelibrary.org/edzine/curriculum/collection/merkeleecology.htm#Isolating> (**A Collection of In-Class Activities in Microbiology: Microbial Ecology**)

[Biofilm hypertextbook](#), Montana State University Center for Biofilm Engineering

Ver mais <http://bacteria-world.com/bacteria-pictures.htm>

Extremófilas em minas

http://www.tc.umn.edu/~toner/research_soudan.html



<http://www.caveslime.org/>

Diversidad y actividad procariótica en ecosistemas marinos

<http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=111>

No caso do ambientes de mar aberto, tipicamente pobres em nutrientes essenciais como azoto e fosfato, a produtividade primária é consequentemente baixa. Em

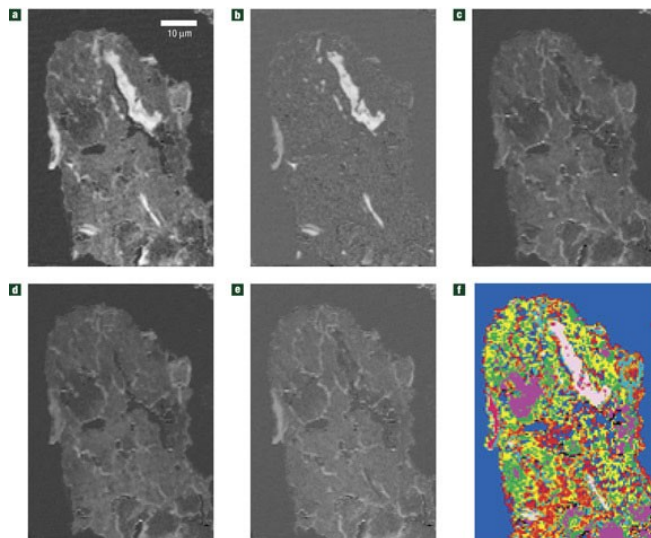
contraste, os sistemas estuarinos e costeiros são áreas produtivas, dado que recebem material orgânico, dissolvido e particulado, proveniente dos rios e de **lixiviamento** dos ambientes terrestres adjacentes. Os lagos de água doce, como o mar aberto, são frequentemente de baixa produtividade

Aulas sobre cultivo de microrganismos-Muito Boa

<http://www.scribd.com/doc/5014423/Aula-2-Cultivo-de-Microrganismos>

Distribuição de micros no solo

<http://www.soilandhealth.org/01aglibrary/010112krasil/010112krasil.ptiic.html>



Distribution of carbon contents and molecular forms in a soil microassemblage from Nandi Forest (Kenya) determined by NEXAFS in combination with STXM. a) Total carbon. b) Aromatic carbon. c) Aliphatic carbon. d) Carboxyl carbon. e) Phenolic carbon. f) Cluster map of carbon forms.

<http://www.nsls.bnl.gov/newsroom/science/2008/06-365.htm>

A termoclina é de grande importância na distribuição dos organismos aquáticos funcionando como uma barreira para estes, uma vez que as mudanças de temperatura da água acarretam em alterações na densidade, viscosidade, pressão, solubilidade e oxigénio, que por sua vez podem influenciar na flutuabilidade, locomoção e respiração dos organismos.