

RESUMO

Nutrientes vegetais

As plantas são capazes de sintetizar todas as moléculas orgânicas de que necessitam a partir da água, do dióxido de carbono atmosférico e de elementos minerais, utilizando a radiação solar como fonte de energia. As plantas absorvem os elementos presentes na solução do solo, mesmo que deles não necessitem. A cultura de plantas em **solução nutritiva** permitiu identificar os elementos essenciais para as plantas, designados por **nutrientes vegetais**.

Os nutrientes podem ser classificados de acordo com critérios fisiológicos ou quantitativos. No primeiro caso, são divididos em quatro grupos conforme as funções desempenhadas nas plantas. Segundo o critério quantitativo, o carbono, o oxigénio, o hidrogénio, o azoto, o fósforo, o potássio, o cálcio, o magnésio e o enxofre são designados por **macronutrientes**, por serem necessários em quantidades mais elevadas, enquanto que o ferro, o magnésio, o zinco, o cobre, o níquel, o boro, o molibdénio e o cloro são designados por **micronutrientes**.

O sódio, o silício e o cobalto são designados por **elementos benéficos** porque estimulam o crescimento de algumas plantas, não sendo essenciais, ou porque são essenciais apenas para algumas espécies vegetais.

Composição do Solo

Os solos são constituídos por três fases: sólida (**matriz**), líquida (**solução do solo**) e gasosa (**atmosfera do solo**). A matriz contém substâncias minerais e a matéria orgânica. As substâncias minerais dividem-se quanto ao tamanho em **elementos grosseiros** e **terra fina**, que inclui a **areia**, o **limo** e a **argila**. A proporção das partículas de diferentes dimensões é designada por **textura do solo**.

A fracção argila, principal responsável (conjuntamente com a matéria orgânica) pelas propriedades químicas do solo, é principalmente constituída por **minerais argilosos**, pertencentes aos grupos da caulinite, esmectite, vermiculite, ilite ou clorite. São minerais com uma predominância de cargas negativas, umas **permanentes** e outras **dependentes do pH**. Os minerais argilosos diferem quanto às cargas que transportam, superfície específica, capacidade de fixar iões potássio e amónio, e ainda por serem ou não expansíveis. Na fracção argila existem ainda **óxidos** e **hidróxidos de ferro, alumínio e manganésio**. Possuem cargas dependentes do pH, podendo apresentar predominância de cargas positivas em solos ácidos. Em regiões áridas e semi-áridas, pode ocorrer acumulação no solo de **carbonatos, sulfatos** ou mesmo **cloretos**.

A matéria orgânica inclui uma grande variedade de seres vivos, desde bactérias, fungos e actinomicetas, até protozoários, nemátodos, ácaros e anelídeos. Os **organismos do solo**, em especial os microrganismos, vão levar a cabo a decomposição de resíduos orgânicos, mas são também responsáveis pela síntese de moléculas orgânicas de elevada estabilidade – as **substâncias húmicas** – que são o principal constituinte do **húmus** e contribuem para propriedades tão importantes como a capacidade de retenção de água e nutrientes, e o poder tampão do solo.

A solução do solo contém vários elementos na forma de iões livres, ou de complexos e quelatos formados com ligandos minerais e orgânicos.

A atmosfera do solo tem teores mais baixos de oxigénio e mais altos de vapor de água e dióxido de carbono, por comparação com a atmosfera. Um bom arejamento do solo é indispensável para a respiração das raízes e organismos do solo. Em solos compactados, com baixa porosidade, ou em solos alagados, geram-se condições de anaerobiose (baixo potencial redox) que são toleradas apenas por algumas plantas e organismos.

A génese do solo envolve a alteração de minerais primários e a formação de secundários, e origina camadas com diferentes cores e características, designadas por **horizontes** do solo. Os pedologistas estudam secções verticais do solo (perfis) que expõem os vários horizontes, para classificarem o solo. Existem diversas nomenclaturas do solo, mas a **classificação FAO**, aceite por todos os investigadores, permite dividir os solos existentes no globo em 28 unidades principais.

Propriedades do Solo

A **cor** do solo influencia a sua temperatura, visto que solos escuros aquecem mais depressa do que os claros. A **temperatura** afecta todos os processos que ocorrem nos solos, desde o crescimento radicular à actividade dos microrganismos. As coberturas do solo e a vegetação isolam o solo, evitando grandes amplitudes térmicas.

Quase todas as propriedades físicas do solo dependem do teor e tipo de argila presente. A **consistência** do solo é traduzida pela adesividade, plasticidade, friabilidade e dureza. Os solos arenosos são soltos, brandos e não são plásticos nem adesivos, enquanto que os solos argilosos ricos em esmectites são adesivos, plásticos, duros e firmes. Os solos arenosos são pouco compressíveis, mas a maior porosidade dos solos argilosos torna-os mais susceptíveis à compressão.

A **estrutura** do solo descreve o arranjo tridimensional das partículas do solo, usualmente unidas em agregados. Solos bem agregados e ricos em matéria orgânica apresentam maior **porosidade** e menor **densidade aparente**.

A matriz do solo pode adsorver iões por processos físicos e químicos. A adsorção de catiões por atracção electrostática resulta numa **capacidade de troca catiónica**, fenómeno de extrema importância por reter os catiões numa forma permutável, evitando a sua perda por lixiviação e mantendo-os disponíveis para as plantas. O húmus e os minerais argilosos dos grupos da vermiculite e esmectite apresentam elevada capacidade de troca catiónica, enquanto que no outro extremo se situam os minerais do grupo da caulinite e os óxidos e hidróxidos de ferro, alumínio e manganésio. Os catiões com maior carga e menor tamanho são adsorvidos preferencialmente em relação aos outros, sobretudo nos colóides com maior capacidade de troca catiónica.

Os minerais argilosos pertencentes aos grupos da ilite, esmectite e vermiculite contêm iões potássio e amónio não hidratados adsorvidos fortemente no seu interior, dizendo-se que ocorreu a sua **fixação**. Estes catiões não trocam com outros mas podem difundir lentamente para fora das partículas, estando em equilíbrio com o nutriente em solução.

Os aniões (com excepção dos iões nitrato e cloreto) são adsorvidos por **troca de ligando**, substituindo grupos hidroxilo na superfície dos colóides, em particular nos hidróxidos de alumínio e oxi-hidróxidos de ferro, onde ficam unidos covalentemente. Os iões fosfato podem estabelecer uma segunda ligação dando origem a um **quelato**.

A **reacção** do solo é avaliada através do pH, medido em água ou em soluções salinas. A reacção do solo condiciona o crescimento vegetal, a actividade dos microrganismos e a disponibilidade de nutrientes. Em solos ácidos podem ocorrer toxicidades de alumínio e manganésio e os níveis de cálcio, magnésio, fósforo e molibdénio em solução são baixos. Nos solos alcalinos, em particular nos calcários, surgem deficiências de fósforo e dos micronutrientes ferro, zinco, manganésio e boro. A correcção da acidez é feita recorrendo à aplicação de calcários, operação designada por **calagem**. A quantidade de calcário a aplicar para elevar o pH, ou eliminar o alumínio de troca, corresponde à **necessidade em cal**.

Os **solos halomórficos** têm teores relativamente elevados de sais podendo ser salinos, quando existem muitos sais em solução, sódicos quando o sódio domina o complexo de troca, e sódico-salinos quando têm características intermédias. A salinização dos solos deriva frequentemente da rega com água de má qualidade em solos sem drenagem interna adequada.

O **potencial de oxidação-redução (potencial redox)** dos solos mede o seu estado de oxidação. Nos solos bem arejados os microrganismos oxidam a matéria orgânica e reduzem o oxigénio a água. Em solos alagados, microrganismos anaeróbios decompõem a matéria orgânica e reduzem substâncias que incluem ião nitrato, compostos de manganésio e ferro, e ião sulfato.

Transporte e Absorção de Nutrientes

Os nutrientes deslocam-se na solução do solo em direcção às raízes, quer por movimento convectivo na massa de água que está a ser absorvida pelas plantas, processo designado por **fluxo de massa**, quer por **difusão** dos locais de maior para os de menor concentração. A velocidade de transporte depende do teor de água no solo, da concentração do nutriente, da velocidade com que o nutriente é absorvido pela planta, da velocidade de difusão do nutriente na água, da temperatura, e de características do solo que influenciam a tortuosidade do percurso e a adsorção dos elementos na matriz. A velocidade de transporte é grande para o

azoto, considerado como nutriente **móvel**, pequena para o fósforo, nutriente **imóvel** no solo, e intermédia para o potássio.

A absorção de água e nutrientes está dependente da formação de um sistema radicular com um comprimento adequado à espécie vegetal. O crescimento das raízes depende de características genéticas, mas é também influenciado por factores ambientais como a temperatura, o arejamento, o pH, o teor de água e nutrientes, e a compacidade do solo.

O movimento radial dos nutrientes nas raízes pode dar-se nos espaços intercelulares e poros das paredes celulares (**apoplasto**), ou no interior das células (**simplasto**). Embora as paredes celulares sejam porosas, permitindo a passagem dos iões, possuem cargas negativas que adsorvem cationes por atracção electrostática.

A componente lipídica das membranas biológicas é impermeável aos iões. **Proteínas de transporte** vão mediar a travessia das membranas, podendo ser subdivididas em bombas, transportadores e canais iónicos. As **bombas** vão realizar um **transporte activo**, com gasto de energia. As mais bem caracterizadas transportam protões através das membranas, com consumo de ATP, e geram um gradiente eléctrico entre o citosol e o apoplasto que é utilizado para o transporte **passivo** de cationes por **transportadores** ou **canais iónicos**. A entrada de aniões é feita de modo activo, sendo acompanhados por protões, processo designado por **co-transporte**.

A velocidade de absorção dos nutrientes depende da sua abundância à superfície radicular, do tamanho do catione, da carga do anião, do pH, da temperatura e do arejamento do solo. O balanço entre cationes e aniões absorvidos vai influenciar o pH da rizosfera, a actividade das bombas de protões e a concentração de ácidos orgânicos nas plantas. A presença de elevada quantidade dum nutriente no solo pode inibir a absorção de outro, fenómeno designado por **antagonismo iónico**.

O transporte de água e solutos no xilema deriva do gradiente do potencial de água entre raiz e parte aérea e dá-se geralmente apenas no sentido ascendente. O fluxo resulta sobretudo da **transpiração**; mas mesmo na sua ausência, a parte aérea continua a receber nutrientes por movimento xilémico devido à **pressão de raiz**. O **transporte no floema** depende do carregamento de açúcares e outras substâncias, que são acompanhadas pela entrada de água e fluxo em direcção aos locais onde se dá a remoção. As folhas expandidas são o principal local de carregamento e os destinos são as raízes, os ápices vegetativos e os órgãos reprodutores. Em algumas situações, como deficiente absorção de nutrientes, formação de órgãos reprodutores, ou época da queda das folhas, ocorre grande **remobilização** de nutrientes à custa da degradação de moléculas nas folhas expandidas e transporte dos nutrientes pelo floema para outros locais. Os nutrientes apresentam diferente mobilidade no floema, sendo o cálcio, o manganésio e o boro os menos móveis, e os macronutrientes (com excepção do cálcio) os mais móveis.

Macronutrientes no Solo

A disponibilidade dos nutrientes para as plantas vai depender das entradas e saídas dos elementos no solo e das transformações que aí ocorrem. A conversão entre formas orgânicas e minerais, **imobilização** e **mineralização**, operada por organismos do solo, é uma componente importante na ciclagem do azoto, fósforo, enxofre e micronutrientes. A taxa de mineralização depende das condições de vida dos organismos em termos de características do solo (pH, arejamento, temperatura, e teor de água) e dos resíduos orgânicos (granulometria, teores de lenhina e fenóis, e equilíbrio entre o carbono por um lado, e o azoto, o fósforo e o enxofre por outro).

A mineralização de moléculas azotadas dá origem ao ião amónio, que é absorvido pelas plantas e organismos do solo, fixado em minerais argilosos, adsorvido no complexo de troca, perdido por **volatilização do amoníaco**, ou convertido a ião nitrato (**nitrificação**). O ião nitrato é também absorvido pelas plantas e organismos do solo. É facilmente perdido por **lixiviação**, por não ser adsorvido na matriz nem formar compostos insolúveis. Em condições redutoras sofre **desnitrificação**, dando origem à formação de azoto elementar e óxido nitroso.

As principais entradas de azoto no solo provêm da fixação biológica do azoto atmosférico, da deposição a partir da atmosfera, e da aplicação de fertilizantes e água de rega. As principais saídas resultam da remoção do nutriente nas culturas, de perdas gasosas, e de perdas por lixiviação, escoamento superficial e erosão.

O fósforo encontra-se no solo como componente da matéria orgânica e de argilas cristalinas e amorfas, adsorvido na matriz do solo e em solução. Os íons fosfato são absorvidos pelas plantas e organismos do solo, adsorvidos na matriz, precipitados, e perdidos por escoamento superficial e erosão. Em solos ácidos, o fósforo encontra-se precipitado com ferro, alumínio e manganésio, ou adsorvido a minerais argilosos e óxidos e hidróxidos de ferro, alumínio e manganésio. Em solos calcários, grande parte do fósforo é precipitado pelo cálcio ou encontra-se adsorvido à superfície das partículas de calcário. A disponibilidade de fósforo é estudada recorrendo a **isotérmicas de adsorção**, e traduzida pelos conceitos de **intensidade** (quantidade de nutriente em solução), **capacidade** (quantidade de nutriente retido na matriz) e **poder tampão** (capacidade do solo para se opor à variação da intensidade).

O enxofre encontra-se em formas minerais e orgânicas. Grande parte do enxofre pode provir da deposição atmosférica, sobretudo em regiões costeiras ou perto de indústrias. As formas minerais de enxofre dependem do estado redox do solo, podendo o nutriente sofrer oxidações ou reduções realizadas por bactérias. O íão sulfato é absorvido pelas plantas e organismos do solo, adsorvido na matriz, precipitado, reduzido a ácido sulfídrico em solos alagados, e perdido por lixiviação, escoamento superficial e erosão.

O potássio encontra-se na estrutura de minerais, fixado em minerais argilosos, no complexo de troca e em solução. A disponibilidade do potássio para as plantas depende do poder tampão do solo e do nível do nutriente em solução. O cálcio e o magnésio encontram-se na estrutura de minerais ou da matéria orgânica, adsorvidos no complexo de troca e em solução. O íão cálcio é normalmente o primeiro catião de troca, o magnésio o segundo e o potássio o terceiro. A proporção entre íons adsorvidos e em solução depende sobretudo do teor de cada elemento e da capacidade de troca catiónica do solo, sendo que o cálcio é adsorvido preferencialmente ao magnésio.

Macronutrientes na Planta

O hidrogénio, o carbono e o oxigénio fazem parte da estrutura de moléculas orgânicas e são obtidos a partir da água, oxigénio molecular e dióxido de carbono. O azoto é o quarto elemento mais abundante nas plantas e aquele que mais frequentemente limita o crescimento vegetal. Faz parte da estrutura de muitas moléculas orgânicas, como proteínas, clorofila e ácidos nucleicos. A absorção do íão nitrato é seguida pela sua redução a íão amónio pelas enzimas **nitrato-redutase** e **nitrito-redutase**. Este, por sua vez, é assimilado pela enzima **glutamina-sintetase**, dando origem ao aminoácido **glutamina**.

A deficiência de azoto traduz-se por crescimento e produção reduzidos e aparecimento de clorose nas folhas mais velhas. O excesso de azoto conduz a menor teor de glúcidos estruturais e de reserva, maior risco de acama nos cereais, maior susceptibilidade a geadas e doenças, e à acumulação de íão nitrato e compostos azotados de baixa massa molar nos tecidos vegetais.

O azoto atmosférico é fixado por alguns microrganismos procarióticos que possuem a enzima **nitrogenase** e o convertem a amoníaco. Alguns dos microrganismos têm vida livre no solo, outros estabelecem simbiose e associações da rizosfera. O **rizóbio** em simbiose com leguminosas, e os actinomicetas do género *Frankia* em simbiose com várias espécies florestais, são capazes de fixar grandes quantidades de azoto.

O fósforo é o segundo elemento que mais frequentemente limita o crescimento vegetal. Faz parte da estrutura de moléculas orgânicas como os nucleótidos, os ácidos nucleicos e os fosfolípidos, e activa muitas moléculas, sendo importante nas transferências de energia. A deficiência de fósforo está associada a menor crescimento e baixo teor de glúcidos de reserva. As folhas mais velhas ficam verde escuro ou avermelhadas, devido à acumulação de antocianinas. A formação de **micorrizas** é importante para a aquisição de fósforo. Os fungos micorrízicos aumentam o volume de solo explorado pela planta, fornecendo água e nutrientes ao hospedeiro.

O enxofre faz parte da estrutura das proteínas, do glutatião, dalgumas vitaminas e coenzimas, e de produtos do metabolismo secundário. A deficiência de enxofre afecta a fotossíntese e a síntese de proteínas, resultando em menor crescimento das plantas. O enxofre é absorvido pelas raízes na forma de íão sulfato. A assimilação do íão envolve quase sempre uma redução, que tem lugar em várias etapas catalisadas por enzimas, e origina o aminoácido **cisteína**. Algumas moléculas contêm grupos sulfato unidos por ligações éster.

O potássio é o terceiro elemento que mais frequentemente limita o crescimento vegetal. É o catião mais abundante nas plantas e não é incorporado em moléculas orgânicas. Determina em grande medida o potencial osmótico das células e neutraliza os aniões. Regula a abertura e fecho dos estomas e a expansão celular. É

necessário para a síntese de proteínas. Aumenta a tolerância ao frio, geada e doenças. Confere resistência à acama nos cereais. As plantas carentes em potássio apresentam manchas cloróticas nas margens das folhas mais velhas, que mais tarde necrosam.

O cálcio está associado às paredes e membranas celulares, estabilizando-as. O nível de cálcio no citosol é muito baixo. Flutuações na concentração de cálcio nas células funcionam como sinal que liga estímulos como a luz, gravidade e nível de fitohormonas, às respostas do metabolismo. Os sintomas da deficiência de cálcio surgem nas regiões mais jovens da planta, com a morte do ápice vegetativo e necroses dos frutos.

O magnésio faz parte da estrutura da clorofila e estabelece uma ponte entre enzimas e as moléculas de ATP. O elemento permanece em grande medida na forma iônica, neutralizando aniões e regulando o pH e a actividade de enzimas. Estimula a fotossíntese, mantém a conformação dos ácidos nucleicos e agrega os ribossomas, preparando-os para a síntese de proteínas. A deficiência de magnésio caracteriza-se por menor crescimento, baixo teor de glúcidos e aparecimento de cloroses entre as nervuras das folhas mais velhas.

Micronutrientes

A disponibilidade dos **micronutrientes catiões** (ferro, manganésio, zinco, cobre e níquel) depende do pH, do potencial redox e do teor de matéria orgânica dos solos. As deficiências de ferro, manganésio e zinco são vulgares em solos calcários, enquanto que a toxicidade de manganésio é frequente em solos ácidos ou alagados.

Os micronutrientes catiões fazem parte da estrutura de várias enzimas e são importantes para vários processos metabólicos, como a fotossíntese, a respiração celular, a lenhificação dos tecidos e a frutificação. A deficiência de ferro em solos calcários – a clorose fêrrica – desencadeia mecanismos de resposta nas plantas designados por **estratégia I** (dicotiledóneas e monocotiledóneas não gramíneas) ou **estratégia II** (gramíneas). As **plantas eficientes** conseguem mobilizar o ferro do solo, enquanto que as ineficientes apresentam menor crescimento e clorose entre as nervuras das folhas mais jovens. Os micronutrientes catiões podem ser fornecidos ao solo ou às plantas, por aplicação foliar, na forma de sais minerais ou de quelatos.

Os **micronutrientes aniões** incluem o boro, o molibdénio e o cloro. O boro é normalmente absorvido na forma de ácido bórico e reage com grupos hidroxilo presentes em moléculas orgânicas. Influencia o metabolismo e transporte dos glúcidos, metabolismo dos ácidos nucleicos e a lenhificação das paredes celulares. A deficiência de boro surge em solos sujeitos a intensa lixiviação e nos solos calcários. A toxicidade de boro está associada a solos de origem marinha, a água de rega rica no elemento, ou à aplicação ao solo de resíduos sólidos urbanos.

O molibdénio faz parte de enzimas associadas ao metabolismo do azoto e fixação do azoto atmosférico pelo rizóbio e microrganismos afins. A deficiência do micronutriente pode surgir em solos ácidos.

O cloro é absorvido na forma de ião cloreto e está presente na estrutura duma fitohormona. O cloro participa na fotossíntese, na osmorregulação, e no mecanismo de abertura e fecho dos estomas. A toxicidade do cloro é vulgar em solos salinos.

Elementos Benéficos

O sódio é essencial para algumas plantas com mecanismo de fotossíntese em C_4 . As plantas cultivadas são divididas em **natrofilicas** e **natrofóbicas**, conforme são ou não beneficiadas pela presença do elemento. Nas plantas natrofilicas o sódio substitui parcialmente o potássio, resultando em maior resistência à secura, crescimento mais rápido quando a planta é jovem e maior acumulação de glúcidos de reserva.

O silício aumenta a rigidez do caule, tornando os cereais mais resistentes à acama. A cutícula fica mais impermeável, favorecendo a conservação da água e aumentando a resistência a parasitas e doenças. As plantas são ainda mais tolerantes a níveis elevados de alumínio e manganésio quando dispõem de silício.

O cobalto é necessário para os microrganismos procarióticos capazes de fixar o azoto atmosférico, beneficiando o crescimento e a produção das leguminosas.

Nutrientes e Produção

O crescimento das plantas depende de **factores genéticos** e **ambientais**, que incluem os **factores climáticos**, **edáficos** e **bióticos**. O crescimento das plantas pode ser simulado construindo sistemas dinâmicos que consideram a influência dos principais factores climáticos – os **modelos de crescimento**. O modelo

CERES-Maize simula o desenvolvimento do milho e a acumulação de biomassa nos diferentes órgãos vegetativos e reprodutores.

Os modelos mais simples não descrevem adequadamente o crescimento quando a água ou os nutrientes são limitantes. As plantas respondem ao fornecimento de nutrientes segundo curvas de resposta características, que podem ser expressas por equações lineares, quadráticas ou exponenciais. Embora as curvas de resposta sejam usadas para obter recomendações de fertilização, são obtidas *a posteriori*, e só são válidas para condições semelhantes às do ensaio que lhes deu origem.

Os modelos de crescimento podem ser expandidos para incorporar equações que relacionem o crescimento com o fornecimento de nutrientes, embora a capacidade de previsão destes modelos não seja tão elevada como quando é simulado o crescimento em condições nutricionais não limitantes.

Os modelos de crescimento podem ser usados como **Sistemas de Apoio à Tomada de Decisões**.

Recomendações de Fertilização

As recomendações de fertilização são desenvolvidas com base nos conhecimentos sobre a cultura, seu potencial produtivo e suas exigências nutricionais, com os objectivos de alcançar o maior retorno económico possível.

As recomendações podem ser baseadas numa **taxa fixa**, ou em análises de terras ou de plantas. A recomendação a taxa fixa não tem em consideração o nutriente existente no solo e indica quantidades de nutrientes mais elevadas do que as recomendações baseadas em análises de terra.

As recomendações de fertilização baseadas em análises de terras exigem a colheita de amostras de terra, que têm de ser representativas da parcela em estudo, e a sua análise no laboratório. Os resultados das análises são calibrados através de ensaios de resposta da cultura. A calibração pode ser feita com base no **princípio da suficiência** – que tem como finalidade fornecer apenas a quantidade de nutriente necessária para obter o máximo retorno económico para essa cultura – ou com base no **princípio do enriquecimento e manutenção do solo**, com a ênfase posta no aumento da fertilidade do solo. Neste último caso, é determinado um limiar crítico ou os solos são classificados em classes ou índices de fertilidade, que indicam uma probabilidade de resposta à aplicação de fertilizantes.

As recomendações de fertilização baseadas em análises de plantas exigem a colheita e análise de plantas ou partes de plantas (folhas, pecíolos, flores, etc.). Têm igualmente de ser calibradas através de ensaios realizados no campo. As recomendações podem ter por base **limiares críticos** de deficiência e toxicidade, ou **gamas de concentrações adequadas**. O **Sistema Integrado de Diagnóstico e Recomendação** permite avaliar o estado nutricional das plantas e ordenar os nutrientes de acordo com o seu grau de limitação, pondo em evidência a importância do equilíbrio entre nutrientes.

Fertilizantes e Correctivos

Os **fertilizantes** são as substâncias orgânicas ou inorgânicas, de origem natural ou sintética, que são aplicadas ao solo ou à planta com a finalidade de fornecer um ou mais nutrientes. Os **adubos** são fertilizantes comerciais, cuja composição é regulada por legislação apropriada.

Os fertilizantes orgânicos mais importantes são os estrumes e os chorumes, os bio sólidos e os compostos. Os **estrumes** e os **chorumes** correspondem aos dejectos dos animais, com materiais usados nas ‘camas’ no primeiro caso, ou com a água de lavagem, no segundo. O azoto e o fósforo estão presentes sobretudo em formas orgânicas, embora grande parte do azoto presente na urina, nas formas de ureia e ácido úrico, se transforme rapidamente em amoníaco/ião amónio. A aplicação de estrumes e chorumes deve ser feita de modo a evitar a volatilização do amoníaco, a desnitrificação, ou o enriquecimento exagerado dos solos com fósforo.

Os **bio sólidos** incluem as lamas de tratamento de esgotos, as lamas celulósicas resultantes do fabrico do papel e resíduos orgânicos de agro-indústrias. A sua composição e natureza é muito variável. Só deverão ser aplicados os bio sólidos que não representem um risco elevado de contaminação do solo com elementos vestigiais.

Os **compostos** ou **compostados** correspondem a resíduos orgânicos sujeitos a uma digestão aeróbia destinada a estabilizá-los, prevenir odores desagradáveis e destruir microrganismos patogénicos. A fracção orgânica dos resíduos sólidos urbanos e as lamas de tratamento de esgotos são frequentemente compostadas.

Os adubos minerais são divididos em **elementares** (azotados, fosfatados ou potássicos), **compostos** (binários ou ternários) e **especiais**. Os adubos podem ser sólidos ou líquidos. As **unidades fertilizantes** (NPK) indicam a percentagem de azoto, de fósforo expresso em P_2O_5 , e de potássio expresso em K_2O , presentes num adubo. A **reação fisiológica** dos adubos traduz a alteração na reacção do solo em resultado da sua aplicação e é quantificada pelos **equivalentes de acidez e basicidade**.

Os **correctivos** são as substâncias que são adicionadas ao solo com a finalidade de modificar ou melhorar algumas das suas características ou propriedades, como a reacção, a estrutura, ou a capacidade de retenção de água. Os principais correctivos alcalinizantes são os calcários, destinados a elevar o pH dos solos ácidos. Os sulfatos de ferro ou de alumínio e o enxofre elementar podem ser usados para baixar o pH dos solos alcalinos.

A aplicação de fertilizantes e correctivos exige tomadas de decisão em relação à quantidade e tipo de produto a utilizar, e quando e como se deve realizar a sua aplicação. Os fertilizantes podem ser aplicados em fundo, quando distribuídos antes ou com a sementeira ou plantação, ou em cobertura. Podem ser aplicados a lanço ou localizadamente – em faixas, com a semente, junto às árvores, etc. Os nutrientes podem ainda ser fornecidos por aplicação foliar ou por cobertura da semente.

Impactos Ambientais e Remediação do Solo

Diz-se que um local está contaminado quando a concentração de alguma substância (o **contaminante**) é superior ao que seria de esperar, sem que no entanto esta cause necessariamente danos. Se tiver consequências negativas para algum organismo a substância é designada por **poluente**. A contaminação (ou poluição) pode ter **origem pontual ou tónica** – quando pode ser identificada de um modo preciso – ou **difusa**.

É necessário desenvolver processos que conduzam a um uso mais eficiente do azoto e fósforo na exploração agrícola, tanto ao nível dos animais como do sistema solo – planta. O azoto, o fósforo e os sedimentos provenientes da erosão dos solos contaminam os meios aquáticos e dão origem ao fenómeno de eutrofização. A contaminação das águas potáveis com nitratos, agroquímicos e organismos patogénicos está associada a impactos negativos na saúde humana.

O uso de vários **elementos vestigiais** causou a sua dispersão no ambiente desde o início da civilização. Os elementos vestigiais mais frequentemente associados a intoxicações no Homem são o chumbo, o cádmio, o mercúrio e o arsénio. Os solos são contaminados com estes elementos em resultado da extracção e uso de minérios e combustíveis fósseis, da utilização de veículos automóveis, do uso de tintas com chumbo, e da aplicação de fertilizantes e agroquímicos.

A produção de **compostos orgânicos sintéticos** aumentou enormemente no século passado, sendo usados diariamente mais de 70000 compostos diferentes. O uso destes compostos está associado a efeitos adversos nas plantas, organismos do solo e aquáticos, animais e Homem.

A composição da atmosfera tem vindo a ser modificada em consequência das actividades industriais e intensificação da produção agrícola. A atmosfera está a ser enriquecida em dióxido de carbono, metano, óxidos de azoto e enxofre, e alguns compostos orgânicos. Vários destes gases absorvem a radiação emitida pela terra, sendo designados por **gases de estufa**.

As **chuvas ácidas** (ou **deposição ácida**) correspondem à deposição de partículas sólidas ou à precipitação (chuva, neve, granizo, etc.), de natureza ácida. As causas primárias das chuvas ácidas são as emissões de óxidos de azoto e enxofre provenientes sobretudo dos combustíveis fósseis. As chuvas ácidas afectam a saúde animal e humana, corroem edifícios, danificam a vegetação, e acidificam os solos e os sistemas aquáticos.

A **remediação do solo** envolve todos os métodos e processos destinados a tratar os contaminantes presentes no solo de modo a contê-los, removê-los, degradá-los, ou torná-los menos prejudiciais. Engloba os **tratamentos in situ** (no próprio local) e **ex situ**. Os métodos de remediação *ex situ* incluem a remoção e substituição do solo, a solidificação, a vitrificação, a lixiviação, a separação de partículas de acordo com a sua granulometria, a incineração, o arejamento e a biorremediação. Os métodos de remediação *in situ* incluem a solidificação, a vitrificação, a capsulagem, a atenuação, a volatilização, a remoção electrocinética, a compostagem, o arejamento, a fitorremediação e a biorremediação.