

CAPÍTULO 14

IMPACTOS AMBIENTAIS SOBRE O SOLO

OSNI JOSÉ PEJON

VALÉRIA GUIMARÃES SILVESTRE RODRIGUES

LÁZARO VALENTIN ZUQUETTE

Os impactos ambientais nos solos vêm se intensificando nas últimas décadas em decorrência de uma série de fatores, tais como: crescimento populacional acelerado, ocupação de áreas inadequadas, aumento na geração e na periculosidade dos resíduos, concentração urbana, agricultura intensiva, uso de agroquímicos, entre outros. Os solos constituem um recurso não renovável, frágil e de fundamental importância para o equilíbrio dos processos superficiais que ocorrem na Terra. Os impactos ambientais decorrentes das atividades humanas conduzem à degradação dos solos e, conseqüentemente, à perda de sua capacidade de suporte às atividades e/ou processos naturais, cujos principais efeitos são: erosão acelerada, contaminação química, compactação excessiva, desertificação, impermeabilização, salinização, perda de biomassa, redução da biodiversidade, perda de matéria orgânica e nutrientes, entre outros. O estabelecimento de leis de controle e o disciplinamento das atividades antrópicas são fundamentais para a redução dos impactos. Nesse contexto, o estabelecimento de indicadores de impacto ambiental no solo tem permitido instituir parâmetros que possibilitam a classificação do grau de impacto e também o acompanhamento de sua evolução. Novas leis ambientais têm incrementado o controle sobre as atividades antrópicas geradoras de impacto e a exigência de estudos geológicos e geotécnicos prévios tem sido fundamental para reduzir os impactos sobre o solo.

14.1 INTRODUÇÃO

O solo é um recurso natural fundamental para o equilíbrio do planeta Terra e para a sustentação da vida. Sua preservação é fundamental por constituir um recurso finito, frágil e não renovável, uma vez que está sujeito a inúmeros impactos e a processos de rápida degradação, ao passo que a sua reposição se faz de

maneira lenta, em escala geológica de tempo. Assim, os efeitos dos impactos ambientais sobre os solos tornam-se difíceis e algumas vezes impossíveis de serem reparados, como é o caso da erosão, pois uma vez que o solo tenha sido retirado, não mais será reposto na velocidade necessária, dado que para se formar um metro de solo, são necessários milhares de anos, conforme visto no Capítulo 2.

Os solos são os grandes responsáveis pelo suporte da biodiversidade nas áreas continentais, além de terem importante papel no controle do ciclo hidrológico e do ciclo do carbono. Além disso, são a base da produção agrícola, servem de suporte para a maioria das obras e construções humanas, são fonte de recursos de materiais de construção e minerais, além de serem usados como repositório de inúmeros resíduos líquidos e sólidos produzidos pelo homem.

A área continental total é de aproximadamente 148 milhões de km², o que representa pouco menos de 1/3 da superfície total da Terra. Considerando que vastas áreas são cobertas por gelo ou apresentam solos congelados (*permafrost*), tem-se uma redução significativa das áreas com solos que podem ser aproveitados. Isto aumenta de maneira expressiva a importância em se reduzir a degradação dos solos pelos impactos decorrentes de seu uso inadequado.

As leis de proteção ambiental preocuparam-se, primeiramente, com a proteção da água e com a poluição do ar, tardando um pouco a perceber a gravidade dos impactos sobre os solos. Isso resultou em um acúmulo de áreas degradadas com problemas de contaminação, erosão, super-exploração e desertificação. Isso constitui, atualmente, um importante passivo ambiental, tanto no Brasil como em diversos países. No Brasil, praticamente não existem levantamentos sistemáticos sobre áreas contaminadas ou degradadas. Presume-se, no entanto, que existam vastas áreas de **solos impactados por diversos tipos de contaminação ou processos superficiais**. O levantamento de áreas contaminadas iniciado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb) em 2002 no estado de São Paulo dá uma ideia da dimensão do problema. Em 2002, foram identificadas 255 áreas contaminadas e, em 2010, este número atingiu 3.675 áreas (Figura 14.1), mostrando uma evolução bastante rápida.

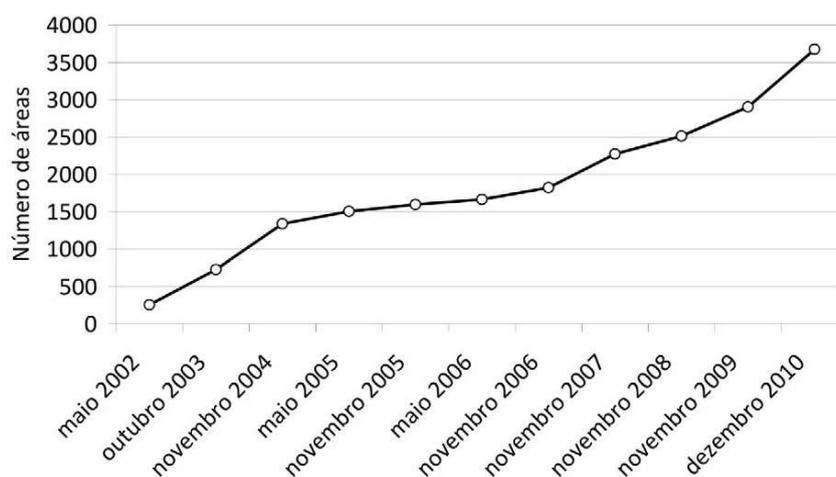


Figura 14.1 Evolução do número de áreas contaminadas no Estado de São Paulo entre 2002 e 2010.

Fonte Cetesb (2010).

Segundo a Cetesb, uma área é considerada contaminada quando, comprovadamente, apresenta poluição ou contaminação causada **pela introdução de quaisquer substâncias ou resíduos** que nela tenham sido depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados de forma planejada, acidental ou até mesmo natural. A Tabela 14.1 mostra a distribuição das áreas contaminadas, segundo o tipo de atividade, nas diversas regiões do Estado de São Paulo (Cetesb, 2010).

Tabela 14.1 Distribuição das áreas contaminadas no Estado de São Paulo em dezembro de 2010

REGIÃO	ATIVIDADE					Total
	Comercial	Industrial	Resíduos	Postos de combustíveis	Acidentes/ Desconhecida	
São Paulo	39	114	28	1.004	5	1.190
RMSP – outros	29	125	20	419	6	599
Interior	60	158	40	1.105	12	1.375
Litoral	15	40	21	223	1	300
Vale do Paraíba	4	34	1	171	1	211
Total	147	471	110	2.922	25	3.675

Fonte Cetesb (2010). São Paulo: Capital; RMSP – outros: demais municípios da região metropolitana; Litoral: municípios do Litoral Sul, Baixada Santista, do Litoral Norte e do Vale do Ribeira; Vale do Paraíba: municípios do Vale do Paraíba e da Mantiqueira; Interior: municípios não relacionados anteriormente.

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) do Estado de São Paulo, em levantamento realizado por incumbência do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), cadastrou cerca de 7 mil áreas de erosão de grande porte (boçorocas e ravinas) só no estado de São Paulo. Um novo estudo está sendo contratado pelo DAEE, para atualização das informações e cadastramento de pontos de erosão e de inundação, com investimentos de cerca de R\$ 1,35 milhão a ser executado pelo IPT em um prazo de 12 meses. Outro dado importante e que demonstra que o número de ocorrências de degradação do solo pode ser enorme é aquele apresentado pela Abrelpe (2010), que mostra que 30% dos municípios brasileiros ainda depositam os resíduos sólidos urbanos em lixões e 32%, em aterros controlados, normalmente sem impermeabilização de fundo adequada e sem estudo para localização dos depósitos.

Os vazamentos em tanques de postos de combustíveis, em áreas urbanas, também constituem um sério problema de contaminação e degradação dos solos e dos recursos hídricos, em especial das águas subterâneas (ver Capítulo 12). Embora não haja dados confiáveis para todo o Brasil, os números apresentados pela Cetesb, para o estado de São Paulo (Tabela 14.1), dão uma ideia da possível extensão do problema.

Em muitos casos, os solos, devido à sua composição mineral e características físicas, propiciam a percolação muito lenta da água e exercem uma função de proteção ambiental, principalmente para os recursos hídricos, retendo ou retardando a propagação de contaminantes. Como visto no Capítulo 2, a quantidade e os tipos de argilominerais presentes nos solos são os grandes responsáveis por estas propriedades, principalmente pela sua capacidade de troca de cátions (CTC) e sua baixa condutividade hidráulica.

A ocorrência de situações de risco associadas aos movimentos de massa, tais como escorregamentos de solos ou de rochas em áreas com declividades acentuadas, foi registrada nos últimos períodos chuvosos no Brasil, como em Santa Catarina em 2008, Rio de Janeiro em 2009 e 2010, Petrópolis e Teresópolis em 2011, entre outros. Os impactos da ocupação inadequada dessas áreas têm, muitas vezes, potencializado a ocorrência e agravado as consequências desses processos.

Portanto, os impactos ambientais em solos, pela sua gravidade e importância atual, necessitam de mais atenção, tanto para impedir o agravamento e/ou o aumento de áreas impactadas quanto para identificá-las, caracterizá-las e elaborar planos para sua recuperação (ver Capítulo 23).

14.2 IMPACTO AMBIENTAL

Neste capítulo, são abordados, especificamente, os impactos ambientais sobre os solos; portanto, não se faz uma discussão sobre o conceito de impacto ambiental em sua acepção mais ampla, pois se trata de assunto abordado em outros capítulos. Consideram-se aqui somente os impactos negativos que acabam por gerar a degradação dos solos. Neste contexto, **áreas degradadas** são entendidas, conforme definição da Cetesb (2001), como áreas onde há a ocorrência de **alterações negativas das suas propriedades físicas**, tais como sua estrutura ou grau de compactidade, a perda de matéria devido à erosão e a **alteração de características químicas**, devido a processos como salinização, lixiviação, deposição ácida e introdução de poluentes. O Capítulo 23 é dedicado ao estudo das áreas degradadas e de técnicas para sua recuperação.

Portanto, os impactos ambientais em solos e a consequente geração de áreas degradadas podem ser causados predominantemente por processos físicos, como é o caso da erosão, ou por processos químicos, tendo a contaminação como exemplo, ou ainda por ambos. Esses impactos podem ser resultado de atividades industriais, agrícolas ou de ocupação urbana (Figura 14.2).

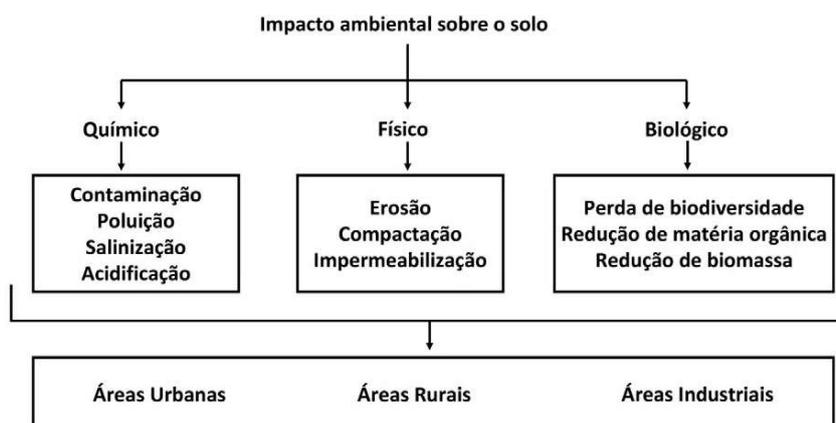


Figura 14.2 Atividades relacionadas aos impactos ambientais sobre os solos.

Embora existam processos naturais, principalmente geológicos, que podem causar impactos e degradação dos solos, neste capítulo são abordados somente aqueles decorrentes da ação humana, como é o entendimento da maioria dos autores no que se refere a impacto ambiental. Levantamentos e mapeamentos de uso e ocupação da terra são fundamentais para o conhecimento das situações que possam gerar impactos. Além disso, com a realização periódica de mapeamentos, tem-se a dimensão temporal das modificações de uso e ocupação dos solos e, eventualmente, de suas consequências em termos de impacto ambiental. Dentro deste contexto, o IBGE (2006) publicou um manual técnico de uso da terra, em que se apresentam, além de um embasamento teórico, as instruções para o levantamento da cobertura e do uso da terra, com informações sobre a escala, a natureza das informações, as unidades de mapeamento e a nomenclatura a serem utilizadas nos mapeamentos.

14.2.1 Indicadores e Índices

Avaliar impactos ambientais nos solos nem sempre é tarefa fácil, devido, principalmente, à falta de padrões de comparação e de definição clara das características da área antes de ocorrer o impacto. Quando se trata de impactos visíveis, como é o caso dos processos erosivos ou da disposição de resíduos de construção e demolição (ver Capítulo 22), os impactos se tornam mais evidentes, mas mesmo nestes casos há necessidade de avaliar o grau da degradação ou do impacto, o que nem sempre é fácil. No caso de contaminação, perda

de estrutura interna do solo ou perda de suas funções básicas, a verificação é mais complicada. Muitas vezes, para saber o grau de impacto, há necessidade do conhecimento prévio da área, ou seja, das condições naturais antes de o impacto acontecer. O *background* natural ou geoquímico é uma medida relativa para distinguir concentrações naturais de um elemento (geogênicas) e a influência de atividades antrópicas nestas concentrações, no caso de contaminação. Como praticamente não existem mais áreas sobre a superfície terrestre que não tenham sofrido algum tipo de influência ou modificação pela ação antrópica, os impactos acabam sendo analisados em relação à última situação que se possa ter como referência antes de terem ocorrido.

Para isso, é fundamental o estabelecimento de **indicadores ambientais** que permitam avaliar o nível de modificação imposta por uma ação ou intervenção no ambiente. O indicador deve permitir realizar medidas que possam ser referidas por índices e deve permitir a mensuração de mudanças e fornecer informações por meio de parâmetros quantitativos ou qualitativos (OECD, 1993). Somente assim é possível avaliar corretamente os impactos: por meio de uma identificação e avaliação sistemática dos efeitos decorrentes da implantação de projetos ou planos de ocupação.

A Tabela 14.2, sintetizada por Silva (2003), apresenta uma série de características e estruturas desenvolvidas por diversos órgãos para o estabelecimento de indicadores. Os modelos baseados em força motriz – pressão – impacto – resposta (DPSIR, da sigla em inglês) têm sido usados com frequência na Europa e foram adotados em vários trabalhos desenvolvidos pelas Nações Unidas. No Brasil, vêm sendo aplicados em trabalhos para o estudo de erosão e assoreamento, além de estudos de escorregamentos de terra. Trabalho realizado por um grupo de pesquisadores brasileiros, espanhóis e argentinos utilizando este modelo demonstrou a relação direta entre o crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) e o aumento de impactos ambientais por erosão, movimentos de massa e assoreamento (Bonachea et al., 2010).

Tabela 14.2 Indicadores ambientais importantes na avaliação de impacto

ESTRUTURA	PUBLICAÇÃO	CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS
<i>Framework for the Development of Environment Statistics (FDES)</i>	<i>United Nations Statistical Division</i> (UNSTAT, 1984)	Relaciona componentes ambientais (flora, fauna, atmosfera, água, solo e assentamentos humanos) a categorias de informação (ação, impacto e reação), em uma combinação das abordagens por meios e pressão-resposta. Adotado pela UNSTAT nos trabalhos em estatística ambiental
<i>Framework for Indicators of Sustainable Development (FISD)</i>	UNSTAT <i>Towards a Framework for Indicators of Sustainable Development</i> (Bartelmus, 1994)	Combinava a FDES com a estrutura da Agenda 21 (e não por meios). Adotado pela UNSTAT nos trabalhos em estatística ambiental
Modelo <i>Pressure-State-Response (PSR)</i>	OECD (1991)	Adaptação feita no âmbito da OECD (1991, 1993) do modelo <i>stress-response</i> para analisar as interações entre pressões ambientais, o estado do ambiente e respostas ambientais. Adotado nos trabalhos de indicadores ambientais da OECD, entre outros
Modelo <i>Driving Force-State-Response (DSR)</i>	OECD (1996)	O conceito de pressões (que pressupõe impactos sempre negativos) foi substituído pelo de <i>driving force</i> , que pode descrever tanto impactos positivos como negativos, como é normalmente o caso dos indicadores sociais, econômicos e institucionais. Matriz que incorpora horizontalmente os três tipos de indicadores (<i>driving force, state, response</i>) e, verticalmente, as diferentes dimensões do desenvolvimento sustentável (aspectos econômicos, sociais, institucionais e ambientais). Adotado no trabalho inicial sobre indicadores da UN CSD
Modelo <i>Driving Force-Pressure-State-Impact Response (DPSIR)</i>	EEA (1999) EUROSTAT (1999, 2001, 2002)	O componente pressões foi reinserido e um novo grupo (impactos), utilizado para detalhar melhor os efeitos sobre o ambiente e facilitar a organização das respostas da sociedade. Utilizado nos trabalhos sobre indicadores ambientais da <i>European Environmental Agency (ELA)</i> e <i>Statistical Office of the European Communities (Eurostat)</i>

Fonte: Silva (2003)

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) publicou, em 2010, a 7ª edição dos Indicadores do Desenvolvimento Sustentável do Brasil, baseado nos 57 indicadores propostos pela *Commission on Sustainable Development* (CSD, 2001), órgão das Nações Unidas. No capítulo referente aos indicadores da dimensão ambiental, relacionam-se indicadores relativos à atmosfera, à terra, à água doce, aos oceanos, à biodiversidade e ao saneamento. Em relação ao uso da terra ou do solo, apresentam-se indicadores sobre o uso de fertilizantes, agrotóxicos, terras em uso agropastoril, queimadas e incêndios florestais, desflorestamento na Amazônia Legal, áreas remanescentes e desflorestamento do Cerrado e da Mata Atlântica. Os **geoindicadores**, entendidos como medidas (magnitudes, frequências, ritmos e tendências) de processos e fenômenos geológicos que ocorrem na superfície terrestre e sujeitos a mudanças ambientais significantes em períodos menores que 100 anos, também são fundamentais para avaliar os impactos ambientais nos solos decorrentes das atividades antrópicas (Berger, 1996).

14.2.2 Impactos Relacionados à Ocupação Urbana

A **ocupação urbana**, pela sua característica intrínseca, é altamente modificadora do ambiente natural e afeta sobremaneira as propriedades dos solos. Portanto, sempre ocasiona impactos ambientais relevantes em todos os componentes, com especial modificação dos solos e dos processos superficiais. Inicia-se pelo **desmatamento** e posterior **impermeabilização da superfície do solo** em extensas áreas, modificando o balanço hídrico regional (Capítulo 3) e provocando, com frequência, problemas de **erosão**, **assoreamento** e **inundações**. A instalação dos equipamentos urbanos promove, muitas vezes, movimentações extensas de terra, escavações e aterros. Dependendo das características geológicas e de relevo das áreas, estas alterações podem provocar situações de risco de movimentos de massa, como escorregamentos ou corridas de detritos, que podem ser muito destrutivos e colocar pessoas, construções e o próprio ambiente em risco.

No entanto, se a instalação dos núcleos urbanos for feita respeitando as **características geológicas e geotécnicas**, os impactos são muito menores e os riscos, minimizados. Isto pode permitir que uma área urbana possa estar harmonicamente integrada com o entorno e funcione como um sistema que, apesar de estar modificado em relação à condição original, apresente propriedades que permitem cumprir sua função. Assim sendo, o solo em área urbana, se estiver cumprindo adequadamente sua função de suporte às atividades ali instaladas, sem apresentar alterações do tipo contaminação, impermeabilização excessiva ou super-exploração dos recursos (por exemplo, água subterrânea), pode ser considerado como não degradado. Na maioria das cidades, infelizmente, esta não é a situação encontrada, pois ocorre disposição de resíduos em locais inadequados, o manejo de águas pluviais sem planejamento, a contaminação em postos de combustíveis e em instalações industriais, além da ocupação de áreas instáveis sujeitas a riscos geológicos.

A lei de parcelamento do solo urbano (Lei nº 6.766/1979) estabeleceu uma série de diretrizes para a ocupação urbana. No entanto, por falta de regulamentação do plano diretor das cidades, muitas medidas não foram adequadamente seguidas na implantação das cidades. Apesar da Constituição de 1988 já mencionar o plano diretor, somente a Lei nº 9.785 de 29 de janeiro de 1999 é que introduziu, em seu Artigo 3º, a necessidade de respeitar o **plano diretor no parcelamento do solo urbano**. No entanto, somente com a edição da Lei Federal do Estatuto das Cidades (Lei nº 10.257/2001) é que, finalmente, foram regulamentados os artigos da constituição e se estabeleceu a obrigatoriedade de todo município, com mais de 20 mil habitantes, realizar seu plano diretor dentro de um prazo de cinco anos. Apesar do avanço relativo, essa lei não estabeleceu, claramente, quais os estudos que devem ser promovidos e quais as informações sobre o meio físico que são fundamentais para o estabelecimento do plano diretor. Em seu capítulo primeiro, a Lei nº 10.257/2001 lista uma série de diretrizes gerais, sendo algumas relacionadas à área ambiental, tais como:

- garantia do direito a cidades sustentáveis, entendido como o direito à terra urbana, à moradia, ao saneamento ambiental, à infraestrutura urbana, ao transporte e aos serviços públicos, ao trabalho e ao lazer, para as presentes e futuras gerações;
- proteção, preservação e recuperação do meio ambiente natural e construído, do patrimônio cultural, histórico, artístico, paisagístico e arqueológico;
- audiência do Poder Público municipal e da população interessada nos processos de implantação de empreendimentos ou atividades com efeitos potencialmente negativos sobre o meio ambiente natural ou construído, o conforto ou a segurança da população.

No Capítulo II, a lei apresenta instrumentos da política urbana e, em especial na seção I, Artigo 4^a – III, aborda o planejamento municipal e a necessidade do plano diretor, do disciplinamento do parcelamento, do uso e da ocupação do solo e do zoneamento ambiental. No item V, trata da instituição de unidades de conservação e, no item VI, da necessidade de estudo prévio de impacto ambiental (EIA), nos termos da legislação que lhe é pertinente.

Com a exigência da lei, o que se observou em muitos municípios foi o seu cumprimento burocrático, com planos sendo executados segundo modelos gerais, que frequentemente não se adequavam às reais características do meio físico da área. Muitos planos foram executados sem estudos mais detalhados das características geológicas, geomorfológicas, hidrogeológicas e geotécnicas, o que ocasionou, em diversos municípios, um parcelamento inadequado do solo e a consequente manutenção e agravamento dos impactos ambientais ou a ocorrência de novos impactos.

A melhor solução para esses casos é a realização de **mapeamentos geotécnicos** detalhados, conforme preconizado por Zuquette & Gandolfi (2004), em escalas adequadas ao planejamento urbano. Para Zuquette (1987) o mapeamento geotécnico é um processo que tem por finalidade básica levantar, avaliar e analisar os atributos que compõem o meio físico, tais como geológicos, hidrogeológicos e hidrológicos. As informações devem ser manipuladas, por meio de processos de seleção, generalização, adição e transformação para que possam ser relacionadas em mapas, cartas e anexos descritivos e utilizadas para fins de engenharia, planejamento, agronomia e saneamento.

O produto dos processos de mapeamento são mapas geotécnicos que, segundo IAEG (1976), podem ser entendidos como um tipo de mapa geológico que classifica e representa os componentes do ambiente geológico, os quais são de grande significado para todas as atividades de engenharia, planejamento, construção, exploração e preservação do ambiente. Portanto, podem ser elaborados mapas básicos, como geológico, geomorfológico, de solos e de águas, bem como cartas e mapas específicos de risco, de planejamento e suscetibilidade à erosão, de escorregamentos e de inundação.

14.2.3 Impactos da Ocupação Rural

A **ocupação da área rural** dos municípios para a produção de alimentos ou o estabelecimento de atividades econômicas também promove modificações no ambiente natural. No entanto, se bem planejada, pode conduzir ao estabelecimento de um novo equilíbrio, respeitando as características e propriedades dos solos sem causar impactos ambientais negativos que ocasionem a significativa degradação do solo. Porém, o emprego de **práticas agropecuárias inadequadas** e o **avanço das atividades sobre as áreas de proteção** (por exemplo, com desmatamento excessivo), podem conduzir à degradação do ambiente. Os solos são a base sobre a qual se sustenta praticamente toda a atividade agropecuária. Portanto, sua preservação é essencial para a sustentabilidade e a produção dos bens necessários à própria sobrevivência do homem. Práticas inadequadas que não consideram os atributos fundamentais dos solos podem levar à erosão, perda de nutrientes, contaminação por agrotóxicos e até desertificação.

O Mar do Aral, no Uzbequistão, é um exemplo desastroso da degradação por práticas agrícolas inadequadas, onde projetos de irrigação mal planejados, conduzidos pela antiga União Soviética na década de 1960, levaram à degradação ambiental de grandes proporções, com o quase desaparecimento de um dos maiores lagos do mundo, à salinização excessiva das águas e do solo e à decadência econômica da região.

O Brasil, por estar situado em área tropical, apresenta perfis de solos bem evoluídos, com argilominerais mais estáveis, mas que, do ponto de vista agrícola, apresentam menor disponibilidade de nutrientes e matéria orgânica. Esses solos, conhecidos como latossolos, exigem adubações constantes e correções de pH para manter a produtividade, atividades que, se não forem bem manejadas, podem causar a **contaminação das águas superficiais e subterrâneas**. O uso indiscriminado de agroquímicos, como herbicidas e pesticidas, também é motivo de preocupação devido a sua persistência no ambiente. Os seus efeitos, interações e processos de retenção nos solos ainda precisam ser mais estudados, principalmente em solos mais porosos e com condutividades hidráulicas maiores.

A contaminação em áreas agrícolas pode ser considerada, em sua maioria, de fonte difusa, pois os contaminantes são adicionados em concentrações baixas e em áreas extensas (Capítulo 11). Portanto, sua identificação e caracterização muitas vezes se tornam bastante difíceis. No Brasil, poucos estudos foram realizados. Destaca-se a pesquisa de Dores (2004) em áreas de intensa atividade agrícola no Mato Grosso. Nesse caso, não foram observadas, na água, concentrações de pesticidas e seus derivados acima dos patamares estabelecidos pela legislação.

Outra consequência decorrente do uso de insumos e defensivos agrícolas é o aumento da concentração de metais tóxicos. A mobilidade desses metais nos solos depende de sua forma química, sendo de suma importância a sua identificação para se estabelecer sua biodisponibilidade ou sua transferência para o lençol freático. Trabalho realizado por Soares (2004) determinou o coeficiente de distribuição (Kd) para cerca de 30 solos diferentes no estado de São Paulo. Esse coeficiente fornece importante informação sobre a capacidade de retenção no solo de diversos metais comumente presentes em agroquímicos.

A adição da vinhaça ou vinhoto, produto resultante da produção do álcool e açúcar, tem sido usada largamente na lavoura da cana-de-açúcar com a finalidade de aumentar a fertilização dos solos. A vinhaça, produto ácido e corrosivo com elevada Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), pode ser muito danosa aos organismos aquáticos. No entanto, em função de seu elevado teor de nitrogênio e fósforo, tem sido adicionada ao solo por meio de irrigação ou canais de infiltração como fertilizante. Embora muitos estudos tenham demonstrado a viabilidade da utilização deste produto nos solos, a Cetesb, por meio da norma técnica P4231, de janeiro de 2005, estabeleceu uma série de regras para a aplicação da vinhaça na agricultura e proibiu a utilização de lagoas de infiltração e de canais permanentes de distribuição sem a devida impermeabilização. Apesar de esta norma ser positiva por estabelecer uma série de condições e restrições quanto à utilização da vinhaça, a caracterização do solo exigida poderia ser melhorada para englobar informações importantes como a composição mineralógica, principalmente da fração argila, além das características *in situ* do solo, como densidade, porosidade, índice de vazios, condutividade hidráulica e compactidade. Isso poderia orientar diferentes protocolos para aplicação da vinhaça de acordo com as propriedades específicas dos solos.

Outro problema recorrente nessas áreas agrícolas é a **erosão dos solos**, associada ao clima tropical com chuvas bastante intensas e concentradas em alguns meses do ano. Desta forma, ocorrem erosões de diversos tipos, desde laminar até erosões lineares concentradas (boçorocas) de grandes proporções, com consequências danosas para a produção agrícola e também para os cursos de água, que acabam assoreados. O uso de práticas agrícolas adequadas, como rotação de culturas, implantação de curvas de nível e terraceamentos, aração em direção correta e utilização do plantio direto, podem auxiliar a minimizar as perdas de solo por erosão.

O gráfico da Figura 14.3, obtido por Medeiros et al. (2011) em parcelas experimentais instaladas sobre um latossolo na região de Campinas (SP), mostra perdas de sedimentos (em toneladas por hectare) 16 vezes maiores em parcelas com preparo da terra feito com arado em relação ao plantio direto, e da ordem de 100 vezes maiores quando a aração é feita morro abaixo, no sentido da declividade.

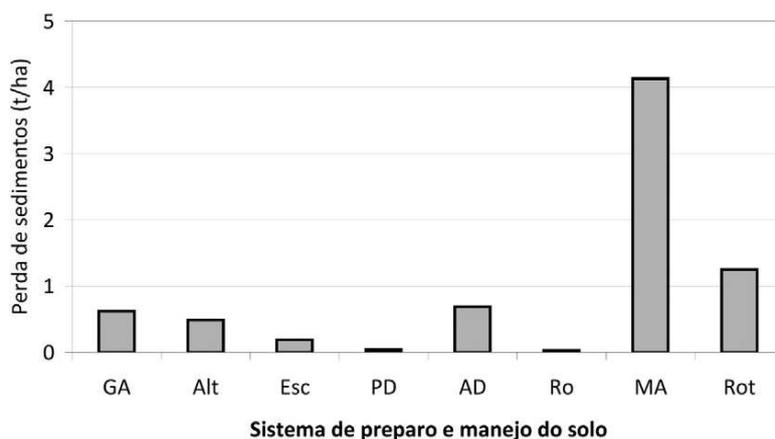


Figura 14.3 Perda de sedimentos em parcelas experimentais em latossolo vermelho (Medeiros et al., 2011).

GA – Grade aradora; Alt – sistema alternado; Esc – escarificador; PD – plantio direto; AD – convencional com arado de disco; Ro – roçado; MA – morro abaixo; Rot – rotavação.

O **desmatamento** das margens de córregos e rios potencializa o transporte dos sedimentos erodidos até os rios. Para avaliação dos impactos, é essencial que haja maior conhecimento das propriedades e atributos dos solos e dos processos superficiais envolvidos, como escoamento superficial, infiltração, propriedades físicas dos solos (granulometria, porosidade, condutividade hidráulica, espessura, erodibilidade, CTC, entre outras). Novamente, mapeamentos geológicos-geotécnicos executados com a finalidade de planejamento regional podem suprir informações fundamentais para o uso agrícola adequado do solo.

Dentro deste contexto, o Zoneamento Ecológico Econômico que vem sendo implementado pelo Ministério do Meio Ambiente, como instrumento do planejamento territorial, pode ser muito útil para a adequada integração entre desenvolvimento e a preservação. Este programa, pensado inicialmente para a Amazônia Legal, está se expandindo para todo o país, ainda em escalas de mapeamento muito pequenas. Caso seja aprimorado e elaborado em escalas mais detalhadas, pode dar suporte adequado para o planejamento, principalmente se incorporar as técnicas do mapeamento geotécnico.

14.2.4 Impactos Relacionados à Atividade de Mineração

Outro fator que contribui para a geração de impacto ambiental no solo é a atividade de **mineração**, que pode ocorrer tanto em áreas urbanas como rurais. A mineração é a extração de bens minerais da natureza. Apesar de ser uma atividade geradora de impactos ambientais, a mineração atua como base de sustentação para a maioria dos segmentos industriais, desempenhando papel fundamental na economia brasileira, não só como geradora de empregos, mas também como fator para o desenvolvimento de diversas cidades. A atividade de mineração, quando exercida sem controle e de maneira inadequada, pode gerar degradação no solo e causar desequilíbrio nos processos físicos e/ou químicos. Para minimizar a degradação proveniente desta atividade, a mineração deve ser planejada antes da implantação do empreendimento e a área deve ser recuperada. Segundo Sánchez (2001), a recuperação destas áreas deve ser executada simultaneamente à mineração, agregando a recuperação ao cotidiano e não ao final do empreendimento.

De acordo com o porte do empreendimento, a mineração pode ser enquadrada nas seguintes classes: i) minerações de grande porte (empresariais ou industriais); ii) minerações de médio ou pequeno porte (portos de areia, pedreiras, lavras de argila e outros); e iii) atividade informal, manual ou mecanizada, e, frequentemente, clandestina (garimpos).

Desta forma, independente do tamanho e do tipo de mineração, esta atividade altera as características do meio ambiente, principalmente no que diz respeito à **remoção da vegetação, alteração da superfície topográfica e da paisagem, rebaixamento do lençol freático, geração de resíduos**, entre outros, conforme a Figura 14.4.

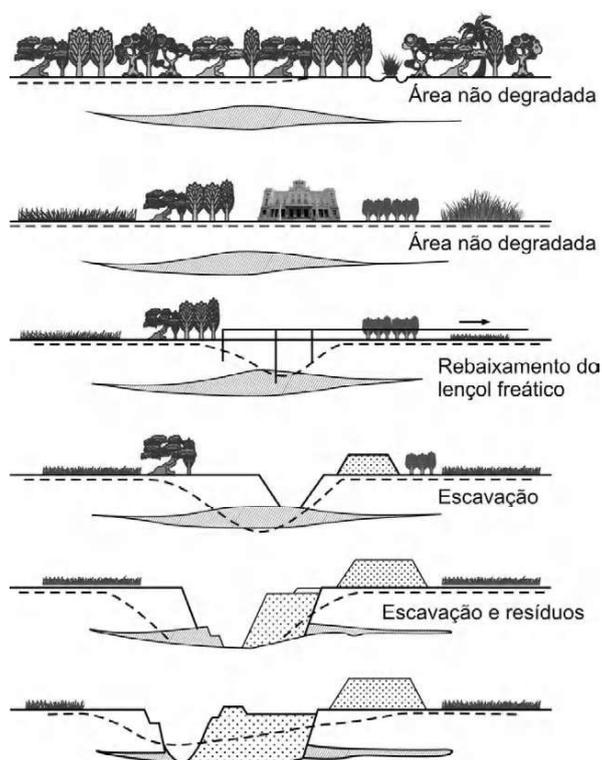


Figura 14.4 Alterações geradas pela atividade de mineração. Fonte: Modificado de Darmer & Dietrich (1991).

A área onde se explora o bem mineral (mina) pode ser a céu aberto, subterrânea ou mista. Quanto ao tamanho dessas áreas, as minas podem ser classificadas em locais e regionais. O tamanho da operação e o método de extração associado com o tipo de mineral que será lavrado são os principais fatores que influenciam na extensão dos impactos causados pela atividade de mineração.

As alterações no solo originadas pela mineração a céu aberto estão relacionadas com:

- i) **Cava.** Retirada da vegetação, alteração da superfície topográfica, perda dos solos superficiais férteis e alteração do nível freático.
- ii) **Resíduos** (pilhas de estéril ou inerte, barragens de rejeitos do concentrado e escórias resultantes do processo de fundição do minério). Alteração da paisagem pela disposição destes resíduos e contaminação do solo e das águas (depende da constituição do resíduo e da existência ou não de impermeabilização na base onde este material é depositado).
- iii) **Área de Beneficiamento.** Contaminação como resultado da utilização de produtos químicos e queima de combustível no beneficiamento e tratamento do minério.

IMPACTOS AMBIENTAIS ADVINDOS DA MINERAÇÃO

A Figura 14.5 exhibe um empreendimento de mineração, em que é possível observar claramente as modificações causadas no meio ambiente. Tais modificações incluem: i) retirada da vegetação, do solo e do material rochoso (**cava da mina**); ii) deposição de materiais (**estéril e barragem de rejeito**); e iii) rebaixamento do lençol freático. Já a Figura 14.6 exhibe uma mina a céu aberto e as modificações decorrentes da escavação do solo e da rocha.

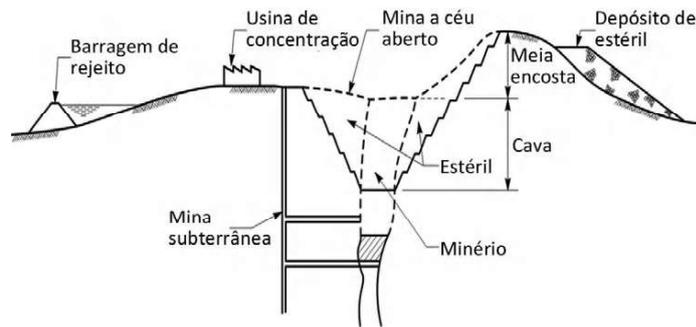


Figura 14.5 Esquema de um empreendimento de mineração. Fonte: Abrão & Oliveira (1998).



Figura 14.6 Mina a céu aberto. Mina de urânio – Poços de Caldas (MG). Foto dos autores.

Mina: área onde se explora o bem mineral; **Lavra:** operação de extrair, da mina, o minério e o estéril; **Minério:** toda substância ou agregado mineral, rocha ou solo, que pode ser aproveitado economicamente; **Estéril:** rocha ou solo sem valor econômico, que é extraído na operação de lavra para o aproveitamento do minério; **Rejeito:** Material resultante do processo de concentração mineral; **Usina de Concentração:** instalação industrial.

Nas minas onde o metal de interesse se encontra associado aos sulfetos, além dos problemas relatados anteriormente, pode ocorrer a **drenagem ácida**. A drenagem ácida pode ser definida como a solução ácida gerada quando minerais sulfetados (pirita – FeS_2 ; calcopirita – CuFeS_2 ; arsenopirita – FeAsS ; esfalerita – ZnS ; galena – PbS e outros), presentes em resíduos de mineração (rejeito ou estéril), são oxidados em presença de água. Essa solução ácida age como agente lixiviante dos minerais presentes no resíduo, produzindo percolado rico em metais tóxicos (chumbo – Pb , zinco – Zn , arsênio – As , cobre – Cu , entre outros) e ácido sulfúrico no solo. Sua ocorrência tem sido relatada na extração de ouro, carvão, cobre, zinco, urânio e outros. Para que não ocorra geração de drenagem ácida, é fundamental que a disposição destes resíduos seja realizada de maneira adequada, com o encapsulamento destes, além da caracterização mineralógica de tais resíduos antes de sua disposição.

Devido a todos os impactos que a atividade de mineração pode gerar, foram elaboradas leis que estabelecem uma série de diretrizes para minimizá-los. De acordo com Kopezinski (2000), um dos marcos da legislação brasileira é a Resolução Conama nº 01/1986, que, regulamentando-se na Lei nº 6.938/1981, definiu os empreendimentos passíveis de **licenciamento ambiental**, entre eles a mineração. Os principais pontos dessa resolução, no que se refere à mineração, são:

- i) toda atividade de mineração é obrigada ao licenciamento ambiental, inclusive a dos minerais empregados na construção civil;
- ii) são exigidos estudos prévios de impacto ambiental (EIA);
- iii) o EIA consolida-se no relatório de impacto ambiental (RIMA);
- iv) o órgão estadual competente, sempre que achar necessário, deve promover audiência pública com os interessados para a discussão do RIMA.

O licenciamento ambiental específico para as atividades de mineração foi regulamentado pelas Resoluções Conama nº 09/1990 e nº 10/1990, publicadas em 28/12/1990. As etapas do licenciamento ambiental de atividades potencialmente causadoras de impactos ambientais serão estudadas em detalhes no Capítulo 29.

Segundo o parágrafo 2º do Artigo 225 da Constituição Federal de 1988: “*aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma de lei*”. O Decreto Federal nº 97.632/1989 fixou prazo de 180 dias para minerações já existentes apresentarem o **Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD)**, além de obrigar a apresentação do PRAD juntamente com o EIA/RIMA para os futuros empreendimentos minerários.

Antes da implantação dessas leis, a atividade de mineração era realizada de maneira precária, gerando a degradação de extensas áreas. No Brasil, existem vários relatos de contaminação do solo e de recursos hídricos em decorrência da disposição inadequada de resíduos da mineração contendo metais tóxicos. A região do Vale do Ribeira, extremo nordeste do Estado do Paraná e sudeste do Estado de São Paulo, foi palco de intensa atividade de mineração, tendo sido explotadas nove minas, cujo foco de interesse principal era a obtenção de Pb e, subsidiariamente, prata (Ag) e ouro (Au).

Segundo Guimarães (2007), as condições de mineração no Vale do Ribeira foram quase sempre rudimentares, não havendo controle sobre os impactos ambientais gerados durante sua fase extrativa e de beneficiamento do minério. Por aproximadamente quarenta anos, os resíduos da mineração foram lançados no rio Ribeira de Iguape. Essa prática foi proibida apenas quatro anos antes da paralisação total das atividades de mineração nesta região. De 1991 a 1995, estes resíduos (rejeito do concentrado e escória de fundição) foram depositados diretamente sobre o solo sem qualquer medida de contenção. Com isso, vários estudos foram realizados na região do Vale do Ribeira para a determinação da contaminação dos solos, dos sistemas fluviais e das águas subterrâneas, além de propostas para minimizar tal degradação.

Outro caso brasileiro de degradação do solo gerado pela disposição inadequada de resíduos da mineração é o da região próxima às instalações da indústria metalúrgica Plumbum Mineração e Metalurgia Ltda., localizada em Santo Amaro da Purificação, na Bahia, no Recôncavo Baiano, às margens do rio Subaé. Nesta cidade, o início das atividades de fundição do minério de Pb ocorreu em 1960, finalizando-se em 1993. O principal passivo ambiental gerado foi a escória de fundição enriquecida por metais tóxicos, que foi utilizada pela população de Santo Amaro para pavimentar ruas, aterros, jardins, pátios de casas, praças e até áreas escolares (Anjos, 1998). Várias pesquisas foram realizadas na região de Santo Amaro da Purificação enfocando a contaminação, seus efeitos e as medidas de mitigação dos impactos causados pela deposição inadequada da escória.

Portanto, os impactos ambientais em solos gerados pelas atividades de mineração devem ser identificados e estas áreas devem ser recuperadas, dando novo uso para estes solos. Nesse contexto, as investigações

geológicas e geotécnicas vêm contribuindo para o entendimento dos processos de degradação causados pela mineração, além de subsidiarem a elaboração de propostas de recuperação destas áreas (ver Capítulo 23).

14.2.5 Tipos Principais de Impacto Ambiental e Degradação dos Solos

Erosão e Assoreamento

A palavra “erosão” deriva do verbo *erodere*, que vem do latim e significa escavar, comer (Zachar, 1982). A erosão é um dos processos de degradação do solo mais intensos e amplamente distribuídos em várias regiões do planeta. Segundo Bennett (1939), a evolução dos processos erosivos é parte integrante da história da civilização e, principalmente, do desenvolvimento da agricultura. A expansão de práticas agrícolas de regiões de clima temperado para as regiões tropicais, por ocasião das colonizações, produziu grandes perdas de solo por erosão e o surgimento das grandes erosões lineares concentradas, conhecidas, no Brasil, como boçorocas (em inglês, *gullies*).

O fenômeno da **erosão** consiste na ação combinada de uma gama de fatores que provocam o **destacamento e o transporte de materiais sobre a crosta terrestre**. Os principais agentes são **água da chuva, rios, geleiras, mares e vento** (Lal, 1990). Dentre estes, as águas de chuva têm grande importância, principalmente em regiões de clima tropical, por propiciarem o escoamento superficial, responsável por grande parte do transporte de materiais inconsolidados ou sedimentos.

A ação dos agentes não é uniforme nas diversas regiões da Terra. Eles dependem de uma série de fatores naturais, tais como: clima, geomorfologia, natureza do terreno (substrato rochoso e materiais inconsolidados) e cobertura vegetal. Estes fatores naturais podem ser alterados pela ação do homem, ocasionando mudanças nos processos erosivos de uma determinada região, quase sempre os intensificando, o que causa impacto e degradação dos solos.

De acordo com diversos autores (Bennett, 1939; Oliveira et al., 1987; DAEE – IPT, 1990), a erosão causada pelo escoamento superficial das águas da chuva pode ser classificada em natural e antrópica. A erosão natural se manifesta pela atuação dos processos erosivos em um ambiente em que é controlada somente pelo equilíbrio dos fatores naturais. Este tipo de erosão vem se processando lentamente ao longo do tempo geológico, recebendo a designação de **erosão normal** ou **natural**. A erosão natural pode sofrer modificações devido a mudanças climáticas ou geológicas, alterando a velocidade e a intensidade do processo. Quando a remoção do solo se torna mais rápida do que sua reposição pelos processos de intemperismo das rochas, tem-se a **erosão acelerada**. Os efeitos deste tipo de erosão acelerada, apesar de consistirem em um desequilíbrio, normalmente se fazem sentir em milhares de anos, sendo, portanto, um processo muito lento quando comparado com os processos erosivos desencadeados ou acelerados pela **ação do homem**. Se as tendências de aquecimento global se confirmarem (IPCC, 2007), podem ocorrer incrementos significativos nos processos erosivos devido ao aumento de eventos extremos, como chuvas, degelo ou mesmo erosão costeira devido à alteração do nível dos mares.

O tipo de erosão mais impactante está relacionado, portanto, à ação antropogênica. Este tipo de erosão recebe o nome de erosão antrópica e sempre se reflete em uma aceleração dos fenômenos erosivos. Constituinto um processo muito mais rápido do que a erosão acelerada natural, pode evoluir em poucos anos, atingindo áreas extensas e ocasionar impactos ambientais negativos.

Tanto a erosão normal quanto a acelerada podem ocorrer de duas maneiras principais: como **erosão laminar** ou por **escoamento concentrado** (Bennett, 1939). A erosão laminar ocorre na superfície do solo como um todo, quando o escoamento da água de chuva ocorre sem se concentrar em canais definidos. Entretanto, quando ocorre a formação de filetes ou canais de água arrastando material, tem-se a erosão concentrada.

Os fenômenos de erosão concentrada podem apresentar proporções diferentes, desde pequenos sulcos ou ravinas, que têm dimensões relativamente pequenas, até processos que atingem grandes áreas, com

aprofundamento dos canais até dezenas de metros, podendo interceptar o nível de água subterrânea. Nesses casos, aparece também um processo de erosão interna (em inglês, *piping*) que provoca o alargamento da erosão, conduzindo ao aparecimento de grandes erosões lineares denominadas de boçorocas ou voçorocas. Esses processos erosivos, principalmente as boçorocas, causam grandes danos, tanto em áreas rurais (Figura 14.7) quanto urbanas (Figura 14.8).

A erodibilidade dos solos, entendida como a propriedade dos solos serem mais ou menos resistentes aos processos erosivos é, juntamente com as características geológicas, geomorfológicas e climáticas da área, fundamental para o entendimento dos processos erosivos. Desta forma, para minimizar os impactos causados pelos processos erosivos, é necessário conhecer as características do meio físico e o grau de erodibilidade dos solos. Pejon (1992) propôs uma metodologia para determinação da erodibilidade e para a geração de cartas geotécnicas para mapeamento de áreas mais suscetíveis ao desenvolvimento de erosões concentradas por escoamento superficial de água.



Figura 14.7 Erosão rural – Município de São Pedro (SP).
Foto dos autores.



Figura 14.8 Erosão em área urbana – cidade de Franca (SP). Foto dos autores.

Os problemas de erosão na maioria dos municípios brasileiros estão relacionados à erosão hídrica, em geral como consequência do manejo inadequado das águas pluviais. Segundo levantamento do IBGE (2008), o número de municípios que ampliou a pavimentação urbana entre os anos 2000 e 2008 foi de 20,6%, atingindo 94,4% dos municípios, com destaque para a região norte do Brasil, com incremento de 82,4%. Apesar de positivos do ponto de vista da qualidade de vida nas cidades, estes números indicam aumento significativo das **áreas impermeabilizadas** e, conseqüentemente, do escoamento superficial. Quando estes projetos não levam em consideração as características geológico-geotécnicas da área, podem conduzir ao aumento da erosão, do assoreamento e das inundações.

A Tabela 14.3, compilada por IBGE (2008), demonstra o reflexo dessa situação, pois 27,3% dos municípios brasileiros que fizeram manejo de águas pluviais tiveram problemas de erosão, sendo que apontaram como principal causa o sistema inadequado de drenagem urbana. Na Figura 14.9, que mostra a distribuição destes municípios no país, pode-se observar que os problemas de erosão estão distribuídos em praticamente todo o território nacional. Em adição, 39,5% dos municípios brasileiros declararam apresentar problemas de assoreamento (IBGE, 2008).

No Estado de São Paulo, a situação também é considerada bastante crítica, pois o DAEE, em conjunto com o IPT, encontrou mais de 7 mil pontos com erosão linear de médio a grande porte, ravinas e boçorocas em levantamentos realizados na década de 1990. Estas erosões são comuns tanto em áreas urbanas como rurais. Algumas, como no caso da erosão localizada na cidade de São Pedro, na região central do Estado de São Paulo (Figura 14.10), têm registro de ocorrência desde os anos 1960 e, apesar de terem passado por várias tentativas de recuperação (Figura 14.11), ainda se encontram ativas nos dias atuais.

Tabela 14.3 Percentual de municípios que tiveram erosão nos últimos cinco anos, por tipo de erosão, segundo as Grandes Regiões

GRANDES REGIÕES	PORCENTUAL DE MUNICÍPIOS QUE TIVERAM EROSÃO NOS ÚLTIMOS CINCO ANOS, POR TIPO DE EROSÃO (%)				
	EROSÃO DO LEITO NATURAL DO CURSO DE ÁGUA	RAVINAMENTO (BOÇOROCA)	EROSÃO LAMINAR DE TERRENOS SEM COBERTURA VEGETAL	EROSÃO DE TALUDES	OUTRO
Brasil	47,3	22,5	63,1	32,7	7,5
Norte	42,4	18,9	59,8	22,0	10,6
Nordeste	45,8	16,8	60,4	25,2	10,6
Sudeste	49,7	27,2	67,9	44,1	5,5
Sul	47,0	16,2	60,3	33,0	7,3
Centro-Oeste	46,1	33,5	59,3	12,0	6,6

Fonte: IBGE (2008)



Figura 14.9 Distribuição espacial dos municípios com problemas de erosão na área urbana. Fonte: IBGE (2008).



Figura 14.10 Boçoroca na cidade de São Pedro (SP). Foto dos autores.



Figura 14.11 Tentativa de recuperação malsucedida na mesma erosão da Figura 14.10. Foto dos autores.

O manejo inadequado das áreas suscetíveis à erosão e as tentativas mal planejadas de recuperação podem agravar o problema e provocar acidentes como ocorrido na ruptura da estrada que SP-191, próxima à cidade de São Pedro (SP) (Figura 14.12). Houve entupimento da drenagem sob o aterro por excesso de sedimentos transportados devido à tentativa de recuperação malsucedida executada na erosão localizada a montante (Figura 14.11). Em algumas situações, a execução de obras de drenagem urbana, quando mal dimensionadas, como já comentado anteriormente, acaba por desencadear erosões de grande porte que levam riscos às áreas urbanas, como pode ser observado na Figura 14.13.



Figura 14.12 Ruptura da Rodovia SP-191 em consequência do assoreamento da drenagem. Ano de 1995. Foto dos autores.



Figura 14.13 Erosão em área urbana causada por problemas na drenagem de águas pluviais (Cidade de Ribeirão Bonito – SP). Foto dos autores.

Bastante preocupante, também, é a associação que se faz de resíduos sólidos com erosão. Vários municípios, no passado, se aproveitaram de boçorocas existentes para depositar esses resíduos, agravando sobremaneira o problema, pois se acrescenta mais um fator de impacto, que é a possibilidade de contaminação do solo e da água, o que aumenta a degradação da área (Figura 14.14).



Figura 14.14 Disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos em boçoroca. Foto dos autores.

Problema muito sério associado às erosões aceleradas é o assoreamento dos cursos de água e represas, agravando os riscos de inundações e comprometendo o abastecimento pela redução da quantidade de água armazenada. As fotos das Figuras 14.15a e 14.15b mostram a represa de abastecimento de água da cidade de Águas de Lindoia (SP) totalmente assoreada. Periodicamente, a represa tem que ser totalmente esvaziada para a retirada dos sedimentos depositados. Este problema é decorrente de desmatamentos realizados na bacia de drenagem a montante da represa, que resultaram em intensos processos erosivos acelerados.



Figura 14.15 Represa totalmente assoreada – cidade de Águas de Lindoia (SP). Fotos dos autores.

A implantação de rodovias e dos sistemas de drenagem a elas associados também pode desencadear ou potencializar as erosões lineares. As estradas rurais, mesmo não pavimentadas, acabam por se tornar concentradoras de águas pluviais, o que pode agravar os problemas erosivos.

Os impactos causados pela erosão costeira também vem se acentuando no Brasil, principalmente em Estados da região Nordeste, onde a execução de obras tem intensificado o problema. A execução de obras de proteção do porto de Fortaleza (CE) provocou variações locais na direção das ondas (Figura 14.16a), com o conseqüente aumento da erosão nas praias (Figura 14.16b). A erosão em margens de rios tem se acentuado, principalmente em áreas que foram desmatadas sem se respeitar os limites impostos pela legislação do código florestal, deixando as margens totalmente desprotegidas.



Figura 14.16 Erosão costeira na região metropolitana de Fortaleza (CE).

Disposição de Resíduos e Rejeitos nos Solos

Os solos têm sido, ao longo da história da humanidade, um grande **depositório** para todo tipo de **rejeitos e resíduos** produzidos pelo homem. Com o advento da Revolução Industrial, a capacidade de geração de resíduos se intensificou sobremaneira, aumentando a quantidade e também a periculosidade dos materiais descartados, tais como: metais tóxicos, produtos químicos, lixo eletrônico, pilhas, baterias, materiais radioativos, entre outros. A simples disposição desses materiais nos solos sem qualquer cuidado foi a regra por muitos anos em diversos países, o que ocasionou impactos ambientais significativos e a degradação dos solos em vastas áreas. Entre os principais materiais descartados ou depositados no solo estão os resíduos sólidos urbanos, os resíduos industriais, os resíduos de atividades agrícolas, os rejeitos de mineração, os resíduos de estações de tratamento de água e esgoto e as substâncias radioativas, entre outras.

Resíduos Sólidos

Os resíduos sólidos serão estudados com profundidade no Capítulo 22. De modo geral, pode-se definir resíduo como qualquer substância ou matéria considerada nas diversas fases de sua utilização como inúteis, descartáveis ou indesejáveis e que necessitam de uma destinação adequada. Os resíduos podem se apresentar em estado sólido, semissólido e resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola e de serviços de varrição. Segundo a Lei nº 12.305, de agosto de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, os resíduos sólidos têm a seguinte classificação:

“I – quanto à origem:

- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas ‘a’ e ‘b’;
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas ‘b’, ‘e’, ‘g’, ‘h’ e ‘j’;
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea ‘c’;
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

II – quanto à periculosidade:

- a) resíduos perigosos: aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica;
- b) resíduos não perigosos: aqueles não enquadrados na alínea ‘a’.”

Segundo a NBR 10.004 (2004), os resíduos sólidos podem ser classificados de acordo com o risco potencial que oferecem em dois níveis principais: Perigosos (Classe I), Não Perigosos (Classe II), sendo esta dividida em Não Inertes (Classe IIA) e Inertes (Classe IIB). O enquadramento do tipo de resíduo deve ser feito de acordo com as normas relativas à amostragem (NBR 10.007), ensaios de lixiviação (NBR 10.005) e ensaios de solubilização (NBR 10.006). As concentrações dos elementos e compostos obtidas nos extratos lixiviados e solubilizados devem ser comparadas com os limites máximos estipulados na NBR 10.004.

Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

Os resíduos provenientes das residências e dos serviços de limpeza pública e parcialmente do comércio se enquadram, em sua maioria, na classe IIA e seu gerenciamento, desde a coleta até a destinação final, é de responsabilidade das prefeituras. Resíduos perigosos, como os de serviços de saúde ou industriais, são de responsabilidade dos geradores, assim como os resíduos da construção civil (entulho), em sua maioria classificados como inertes. No entanto, em qualquer um dos casos, a disposição final ou o eventual reaproveitamento dos resíduos deve ser feito de acordo com a regulamentação dos órgãos ambientais, de maneira a evitar impactos ambientais e riscos à população.

A geração de RSU vem se acentuando rapidamente no Brasil (já ultrapassa 1 kg/hab.dia), totalizando cerca de 61 milhões de toneladas em 2010, o que representa um crescimento de quase 7% em relação ao ano anterior, bem acima do crescimento populacional (Abrelpe, 2010). Deste total, cerca de 54 milhões de toneladas são coletadas (88%), mas uma grande parcela ainda não tem uma destinação adequada (42,4% ou aproximadamente 23 toneladas no ano de 2010).

O tipo mais comum de destinação final dado aos resíduos sólidos urbanos é sua colocação sobre o solo em depósitos que são classificados em três tipos principais:

Lixões ou vazadouros. Locais onde o lixo é depositado a céu aberto sem qualquer proteção ao ambiente ou à saúde pública. Em geral, não há qualquer controle sobre o tipo de resíduo descartado nessas áreas, o que aumenta os riscos.

Aterro controlado. O lixo é confinado em locais mais restritos e normalmente é recoberto diariamente com uma camada de solo para proteção. A área é isolada de maneira a reduzir a contaminação ambiental. No entanto, em geral, não há impermeabilização de fundo nem sistema de coleta dos líquidos lixiviados (chorume).

Aterro sanitário. Destinação final do lixo considerando um projeto de engenharia geotécnica, em que vários aspectos são considerados, desde a escolha do local, a seleção de materiais para impermeabilização, a execução de drenos, o tratamento do chorume e os estudos de estabilidade. Na Figura 14.17, podem ser observadas as características desse tipo de depósito, que é uma das formas de disposição mais utilizada em todo o mundo, por garantir um nível elevado de proteção ambiental e a saúde pública (ver Capítulo 22).

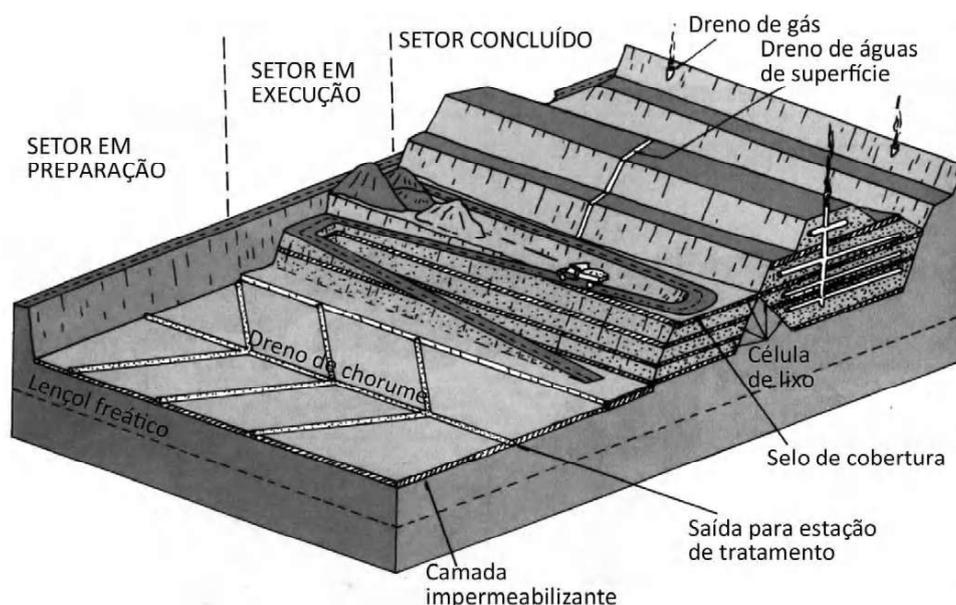


Figura 14.17 Aterro sanitário. Fonte: Manual Gerenciamento de Lixo – IPT (2000).

Embora a situação da disposição dos RSU tenha evoluído no Brasil, como mostra a Tabela 14.4, cerca de 50% dos municípios brasileiros destinavam seu lixo a vazadouros a céu aberto em 2008 (IBGE 2008). Em termos de impacto ambiental nos solos, os aterros controlados, por não terem impermeabilização de fundo, também constituem fonte de contaminação, o que torna a situação ainda mais grave.

Segundo o IBGE (2000), 63% dos municípios pequenos, com menos de 50 mil habitantes, destinavam os RSU aos lixões, aumentando a distribuição de pontos de impacto ambiental no solo e nos recursos hídricos (Figura 14.18).

Tabela 14.4 Destino final dos resíduos sólidos no Brasil no período 1989 a 2008

ANO	DESTINO FINAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS, POR UNIDADE DE DESTINO DOS RESÍDUOS (%)		
	VAZADOURO A CÉU ABERTO	ATERRO CONTROLADO	ATERRO SANITÁRIO
1989	88,2	9,6	1,1
2000	72,3	22,3	17,3
2008	50,8	22,5	27,7

Fonte: IBGE (2008)

Apesar dos avanços observados, levantamentos recentes (Abrelpe, 2010) indicam que somente 39% dos municípios brasileiros destinam os RSU aos aterros sanitários (Tabela 14.5). A situação é um pouco melhor nos grandes centros urbanos, que têm destinado seus RSU a aterros sanitários, o que faz com que 57% de todo lixo coletado seja destinado aos aterros sanitários e somente 19% aos lixões, como mostrado na Figura 14.19a. O aterro sanitário é uma técnica utilizada para confinar os RSU na menor área e volume possível, mantendo-os isolados do solo natural por materiais de permeabilidade bastante baixa (barreiras impermeabilizantes). Apesar de, no Brasil, a região sudeste apresentar os melhores índices quanto à destinação dos RSU (Figura 14.19b), ainda assim o estado de São Paulo deixa de enviar, a aterros sanitários, 24% do lixo coletado (Abrelpe, 2010).



Figura 14.18 Disposição de RSU em lixão na região Norte do Brasil. Foto dos autores.

Com a edição da nova lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), que estabelece um prazo de quatro anos a partir da sua promulgação para que os municípios eliminem os lixões e deem uma destinação ambientalmente correta aos RSU, a situação tende a melhorar mais rapidamente.

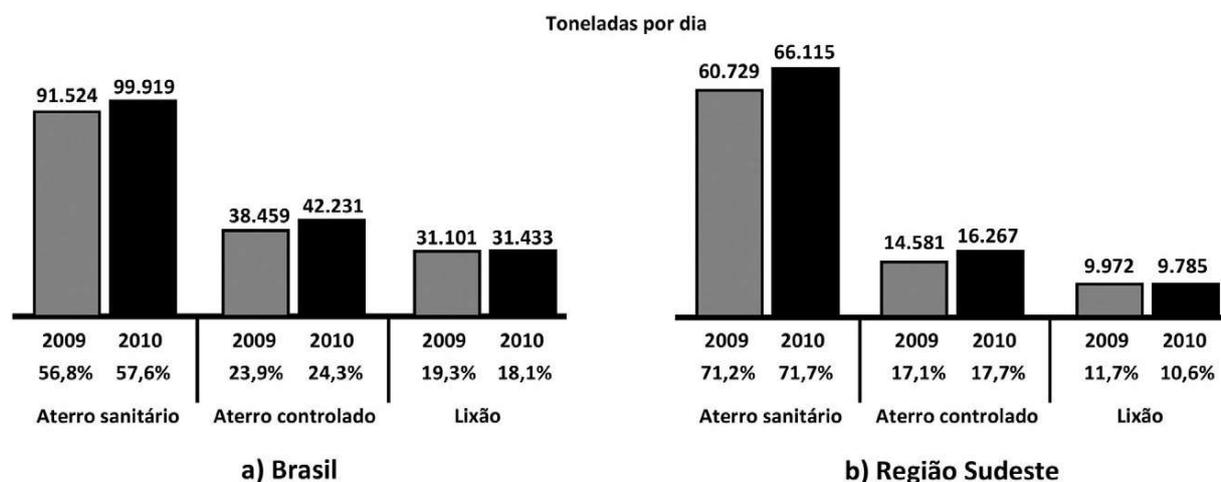


Figura 14.19 Destinação final de RSU (t/dia) no Brasil (a) e na região sudeste (b).

Tabela 14.5 Quantidade de municípios por tipo de destinação final de RSU

DISPOSIÇÃO FINAL	ANO 2010 – REGIÕES E BRASIL					
	NORTE	NORDESTE	CENTRO – OESTE	SUDESTE	SUL	BRASIL
Aterro Sanitário	85	439	150	798	692	2.164
Aterro Controlado	107	500	145	639	369	1.760
Lixão	257	855	171	131	127	1.641
BRASIL	449	1.794	466	1.668	1.188	5.565

Fonte: Abrelpe (2010)

Para reduzir os impactos ambientais da disposição dos RSU nos solos não basta destinar o lixo coletado a aterros sanitários. Deve-se, também, atuar de maneira a reduzir a quantidade de lixo a ser descartado, aplicando a regra dos três Rs, ou seja, Reduzir, Reutilizar, Reciclar (ver Capítulo 22).

A destinação final aos aterros sanitários, apesar de adotada na maioria dos países como uma solução ambientalmente correta, necessita de controle e planejamento, desde a fase de escolha do local até o monitoramento posterior ao encerramento do aterro. Estudos geológico-geotécnicos e hidrogeológicos são essenciais para a definição dos locais de instalação e dos materiais de impermeabilização e cobertura, além da necessária consideração de diversos outros aspectos como os socioeconômicos.

A contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas ocorre principalmente pela liberação do chorume, proveniente da decomposição dos materiais orgânicos presentes nos RSU, que tem seu volume aumentado pela água pluvial infiltrada no aterro. Este líquido escuro de odor forte é altamente contaminante e contém, além das substâncias orgânicas, grande quantidade de metais que podem contaminar o solo e as águas. Mais detalhes sobre as características do lixiviado de aterros podem ser encontrados no Capítulo 22. Para impedir a contaminação, os aterros sanitários devem contar com sistemas de proteção que envolvem revestimento impermeabilizante de fundo, paredes laterais e cobertura, além de drenos específicos para líquidos e gases e sistemas adicionais para tratamento do chorume coletado (Figura 14.17).

Os solos argilosos podem constituir barreiras naturais à migração de contaminantes, mas é difícil assegurar sua continuidade e a homogeneidade de suas propriedades. No entanto, solos argilosos com mineralogia adequada, quando compactados, apresentam condutividades hidráulicas muito baixas, permitindo

seu uso como barreira nos aterros sanitários. Pejon et al. (2010) estudaram materiais de alteração da Formação Corumbataí, no estado de São Paulo, e encontraram condições muito propícias para uso desses materiais como barreiras argilosas compactadas, por apresentarem condutividades hidráulicas muito baixas quando compactados e capacidade de troca de cátions da ordem de 22 cmol/kg, suficientes para promover a retenção e o retardamento da chegada dos poluentes ao solo natural ou à água subterrânea. Os materiais geossintéticos, como mantas de Polietileno de Alta Densidade (PAD) ou Geocompostos Bentoníticos (GCL) têm sido usados também com sucesso como barreiras à migração de poluentes do aterro para os solos (Rowe, 2004).

Quando o solo natural não apresenta condições adequadas à retenção do contaminante e não são usadas barreiras impermeabilizantes, a migração dos contaminantes para áreas mais profundas pela base do depósito dos resíduos pode comprometer a qualidade da água subterrânea. Estudos geofísicos utilizando a técnica geoeletrica na área do antigo lixão da cidade de São Carlos (SP) (Veloza, 2006) mostraram evidências da ocorrência de migração de chorume pela base do depósito de lixo que não tem barreira impermeabilizante (Figura 14.20a). O antigo lixão foi inadequadamente instalado em uma erosão, em área de afloramento dos arenitos da formação Botucatu (Figura 14.20b), e se constitui atualmente em fonte de contaminação que pode comprometer a qualidade da água subterrânea.

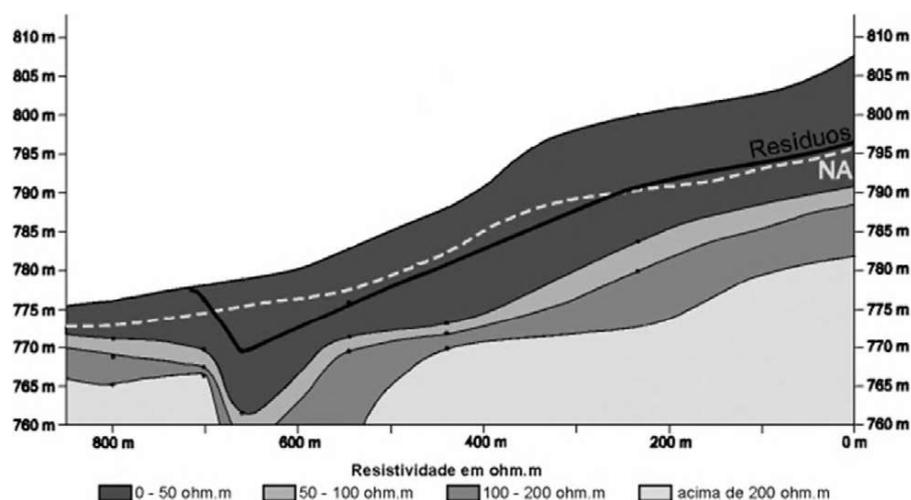
Contaminação

Na literatura internacional e nacional, os termos “poluentes” e “contaminantes” são utilizados com frequência como sinônimos. No entanto, um é mais passivo (contaminante) que o outro (poluente) quanto à questão do risco à saúde humana. Conforme Braga et al. (2003), **contaminação** refere-se à transmissão de substâncias ou microrganismos nocivos à saúde, não implicando, necessariamente, um desequilíbrio ecológico do meio, enquanto **poluição** implica em tal desequilíbrio. O termo “poluente” é empregado para indicar que uma dada substância, em um processo de investigação, pode ser considerada como potencial fonte de risco à saúde humana e ao meio ambiente (Yong, 2001; Yong & Mulligan, 2004). No presente capítulo, o termo “contaminação” é empregado de maneira genérica, sem distinção entre poluição e/ou contaminação, correspondendo à alteração na concentração e composição do solo pela introdução de substâncias que podem vir ou não a causar riscos à saúde humana.

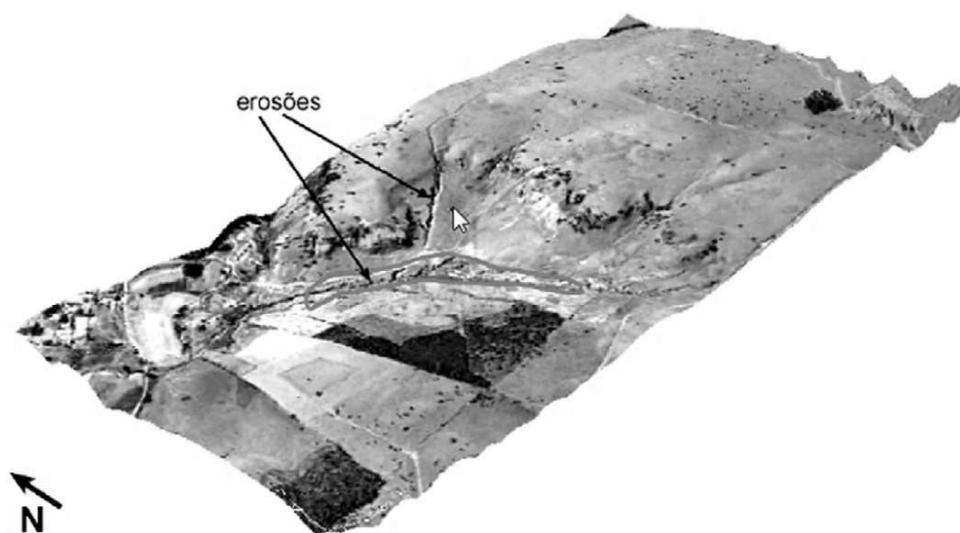
A contaminação do solo pode ser pontual ou difusa, sendo que as principais fontes atualmente enquadradas nesse aspecto são: **lixões, vazamentos de rede de esgoto, lagoas de tratamento, efluentes, resíduos** (urbanos, industriais, de mineração), **agrotóxicos, fertilizantes e vazamentos de tanques enterrados de armazenamento de combustíveis**. Os contaminantes associados a essas fontes podem ser classificados como **orgânicos, inorgânicos e patogênicos**. Esses contaminantes podem estar no estado gasoso, na fase líquida livre, em solução na água subterrânea e na forma sólida ou semissólida.

Os contaminantes de origem orgânica incluem: hidrocarbonetos (etanos, etenos, benzenos, toluenos, xilenos e outros), orgânicos sintéticos (fenóis, éteres, aldeídos, cetonas, ácidos carboxílicos e outros), orgânicos nitrogenados, sulfonados e fosforados. Os compostos orgânicos voláteis (VOCs) estão entre os contaminantes mais encontrados na água subterrânea, sendo o cloroetileno (cloro de vinila) o mais tóxico deles. O BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno) é um grupo importante de compostos voláteis encontrados no petróleo e em seus derivados (gasolina), sendo estes perigosos ao meio ambiente. Neste caso, postos de abastecimento de combustível e processos retalhistas de combustível são as fontes mais comuns de contaminação do solo e das águas subterrâneas.

Os compostos orgânicos incluem dois grupos: LNAPL e DNAPL, conforme visto no Capítulo 12. O LNAPL são substâncias não miscíveis, mais leves que a água (como a gasolina e óleos), permanecendo sobre o nível freático. O DNAPL são substâncias mais densas que a água (tricloretano, tetracloreto de carbono, diclorobenzenos e outros), que migram verticalmente sobre a influência da aceleração da gravidade.



(a)



(b)

Figura 14.20 Evidências de contaminação em área de antiga erosão na cidade de São Carlos (SP), utilizada como depósito de RSU até o ano de 1996. (a) Perfil de resistividades elétricas, indicando nível elevado de contaminação na base do lixão. (b) Foto aérea da antiga erosão onde foi depositado o lixo urbano. Fonte: Velozo (2006).

Os contaminantes inorgânicos compreendem, principalmente, os metais tóxicos, também conhecidos como elementos traços. Os metais tóxicos são encontrados naturalmente em baixas concentrações nas rochas e solos e, em alguns casos, também como compostos solúveis em águas da zona saturada do perfil de solo. Entretanto, as atividades antrópicas contribuem para o aumento da concentração destes elementos no meio ambiente, causando risco à saúde humana. Com relação ao impacto ambiental, os metais mais importantes são: arsênio (As), cádmio (Cd), chumbo (Pb) e mercúrio (Hg), pois são elementos não essenciais aos organismos vivos e potencialmente tóxicos para estes. Além dos metais, são considerados contaminantes inorgânicos os metais alcalinos e os alcalino-terrosos (Na, Ca, Mg, K).

Os metais tóxicos não são biológicos ou quimicamente degradáveis. Duas situações podem ocorrer com este tipo de contaminante: ou eles permanecem no local em que foram depositados ou podem ser

transportados por longas distâncias. Nos estudos de avaliação ambiental, torna-se necessário comparar as concentrações de metais obtidas no local da contaminação com valores de referência ou *Guidelines* (para solos e águas subterrâneas) e com valores naturais (*background* geoquímico). Uma dificuldade adicional, no caso dos solos, decorre da falta do estabelecimento de padrões de referência de qualidade (valores orientadores), para identificar se a área foi contaminada, uma vez que os solos apresentam grande diversidade de materiais e de composição química. A Cetesb, em 2001, elaborou uma primeira lista com 37 substâncias com valores orientadores para os solos. Esta lista foi atualizada e complementada, em 2005, para 84 substâncias, incluindo vários metais tóxicos, hidrocarbonetos e outras substâncias químicas como benzeno, fenóis, ésteres e pesticidas organoclorados. A tabela da Cetesb é devidamente estruturada com a indicação de valores de referência para diversos tipos de contaminantes em distintas condições, como solo em indústria, solo em áreas habitadas, solo em regiões agrícolas, águas de superfície e águas subterrâneas.

Os valores de referência devem ser utilizados com certo cuidado, pois são indicativos da possível contaminação por um determinado elemento. Concentrações elevadas de um dado metal não necessariamente representam contaminação e podem ter origem natural. Além da comparação da concentração do elemento com os valores de referência e a amostra controle (*background*), é necessário identificar se está ocorrendo transporte e qual a distância percorrida pelos produtos potencialmente tóxicos. Para fazer uma estimativa da área afetada pela contaminação, é necessário conhecer os fatores que influenciam o transporte dos poluentes, tais como, as condições ambientais e as propriedades dos contaminantes.

O transporte de contaminante pode ser definido como sendo o deslocamento de um determinado composto em meio a uma ou mais camadas de solo, tanto na zona não saturada como na saturada. A migração do contaminante através do meio poroso do solo ocorre segundo mecanismos de transporte associados a processos físicos (advecção, dispersão mecânica e difusão molecular), químicos (adsorção/desorção; precipitação/dissolução; troca iônica; complexação e outros) e biológicos (sorção biológica).

Quanto ao tipo de contaminante, os principais fatores que influenciam no transporte são: i) densidade; ii) concentração; iii) solubilidade e iv) volatilidade. Já com relação ao meio poroso, os principais fatores que influenciam no transporte são: i) mineralogia; ii) teor de finos; iii) distribuição de vazios e iv) capacidade de troca catiônica (CTC), entre outros.

Desta forma, em estudos de contaminação, é importante caracterizar o contaminante e o solo quanto aos aspectos geológicos e geotécnicos. A forma de distribuição e o tamanho dos grãos (granulometria), os poros existentes entre eles (porosidade), a conexão entre estes poros (permeabilidade) e a sua composição, são algumas das propriedades do solo que devem ser muito bem estudadas em avaliações de uma área contaminada. Quando um contaminante de qualquer natureza entra em contato com o solo, podem ocorrer os seguintes processos: retenção do poluente (antes de atingir a água subterrânea) a partir de reações com o constituinte mineral do solo; interação entre o poluente e a matéria orgânica (retenção); migração do poluente pelos espaços vazios (poros) até atingir a água subterrânea, entre outros. Assim, o poluente pode ser encontrado tanto na zona não saturada do solo como na zona saturada (ver Capítulo 2). Neste último caso, ele pode contaminar a água subterrânea e prejudicar o consumo quando esse é objeto de abastecimento de água potável para uma população e/ou núcleo populacional.

REVISÃO DOS CONCEITOS APRESENTADOS

Inicialmente, foi ressaltada a importância dos solos como um sistema e as implicações advindas da eventual destruição deste importante recurso natural que se renova muito lentamente. Os principais aspectos abordados no capítulo foram:

- ▷ Níveis de degradação e contaminação atual dos solos no Brasil e suas possíveis causas e consequências.
- ▷ Os principais tipos de impactos que podem atingir os solos e sua relação com as atividades antrópicas.
- ▷ O conceito de indicadores e índices ambientais e sua importância para a avaliação do impacto, quanto à magnitude, intensidade e variação temporal.
- ▷ Apresentação e discussão dos impactos ambientais sobre os solos resultantes de atividades urbanas, rurais e de mineração.
- ▷ Discussão e análise dos principais impactos relacionados à erosão e assoreamento, disposição de resíduos e rejeitos nos solos e contaminação oriunda de diversas fontes.

SUGESTÕES DE LEITURA COMPLEMENTAR

- ▷ SÁNCHEZ, L. E. *Avaliação de impacto ambiental. Conceitos e métodos*. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 495 p.
- ▷ BOSCOV, M. E. G. *Geotecnia ambiental*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 248 p.

REFERÊNCIAS

- ABRÃO, P.C.; OLIVEIRA, S.L. Mineração. In: OLIVEIRA, A. M.S; BRITO, S.N.A. (editores). *Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE, 1998. 586 p.
- ANJOS, J. A. S.A. *Estratégias para remediação de um sítio contaminado por metais pesados – Estudo de caso*. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Universidade de São Paulo (USP), 1998. 157 p.
- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil*. 2010. Disponível em <<http://www.abrelpe.org.br>>. Acesso: abril 2012.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.004:2004. *Resíduos Sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 71 p.
- _____. NBR 10.005:2004. *Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 16 p.
- _____. NBR 10.006:2004. *Procedimentos para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 7 p.
- _____. NBR 10.007:2004. *Amostragem dos resíduos sólidos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 25 páginas
- BENNETT, H. H. *Soil conservation*. Nova York: McGraw-Hill, 1939. 993 p.
- BERGER, A. R.; IAMS, W. J. *Geoindicators: assessing rapid environmental changes in Earth Systems*. Rotterdam: A. A. Balkema, 1996. 466 p.
- BONACHEA, J.; BRUSCHI, V. M.; HURTADO, M. A.; FORTE, L. M.; SILVA, M.; ETCHEVERRY, R.; CAVALLOTTO, J. L.; DANTAS, M. F.; PEJON, O. J.; ZUQUETTE, L.V. Natural and human forcing in recent geomorphic change: case studies in the Rio de la Plata basin. *Science of the Total Environment*, v. 408, n. 13, p. 2674-2695, 2010.
- BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. *Introdução à engenharia ambiental*. São Paulo: Prentice Hall, 2003. 305 p.
- BRASIL *Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010*. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). 2010. Disponível em: <www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso: abril 2012.

- CSD – Commission on Sustainable Development. Órgão das Nações Unidas. 2001. Disponível em: <http://www.un.org/esa/sustdev/natlinfo/indicators/isdms2001/table_4.htm>. Acesso: abril 2012.
- CETESB. Manual de gerenciamento de áreas contaminadas. São Paulo: Cetesb, 2001. 389 p.
- ____ Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares*. São Paulo: Série Relatórios. 186 p.
- DARMER, G.; DIETRICH, N. L. *Landscape and surface mining: ecological guidelines for reclamation*. English language translation of landschaft und tagebau, oekologische leitbilder fuer die rekultivierung by gerhard darmer; edited by Norman L. Dietrich; translated by Marianne Elfein-Capito. Nova York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 201 p.
- DAEE-IPT – Departamento de Águas e Energia Elétrica – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. *Controle de erosão: bases conceituais e técnicas, diretrizes para planejamento urbano e regional; orientação para o controle de boçorocas urbanas*. São Paulo: DAEE-IPT, 1990. 92 p.
- DORES, E. F. G. C. *Contaminação de águas superficiais e subterrâneas por pesticidas em Primavera do Leste, Mato Grosso*. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2004. 282 p.
- GUIMARÃES, V. *Resíduos de mineração e metalurgia: efeitos poluidores em sedimentos e em espécie biomonitora – Rio Ribeira de Iguape – SP*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo (USP), 2007. 160 p.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008*. Rio de Janeiro. Reimpressão 2010.
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. *Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado*. São Paulo: IPT Publicação, 2000. 370 p.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Synthesis Report*. IPCC. 58 p. Disponível em <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf>. Acesso: abril 2012.
- IAEG – International Association of Engineering Geology. *Guide pour la préparation des cartes géotechniques*. Paris: Les Presses de l'Unesco, 1976. 79 p.
- LAL, R. (*Soil Erosion in the Tropics: Principles and Management*. Nova York: McGraw-Hill, 1990. 580 p.
- OLIVEIRA, A. M. S.; PONÇANO, W. L.; SALOMÃO, F. X. T.; DONZELI, P. L.; ROCHA, G. A.; VALÉRIO FILHO, M. *Questões metodológicas em diagnósticos regionais de erosão: a experiência pioneira da Bacia do Peixe Paranapanema – SP*. In: Simpósio de Controle de Erosão, Marília, São Paulo: ABGE, 1978.
- OECD – Organisation for economic co-operation and development. *Core set of indicators for environmental performance reviews. A synthesis report by the Group on the State of the Environment*. Environment Monographs nº 83. 39 p., 1993
- PEJON, O. J.; MUSSO, M.; SOUZA, R. F. C.; MARQUES, V. S. *Characteristics of compacted clay liners to environmental protection*. In: 11th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment, Auckland, Nova Zelândia. v. 1. p. 4435-4441, 2010.
- PEJON, O. J. *Mapeamento geotécnico regional da folha de Piracicaba (SP): estudos de aspectos metodológicos de caracterização e apresentação de atributos*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo (USP), 1992. 224 p.
- SÁNCHEZ, L. E. *Desengenharia. O passivo ambiental na desativação de empreendimentos industriais*. São Paulo: EDUSP, 2001. 254 p.
- SILVA, V. G. *Avaliação da sustentabilidade de edifícios de escritórios brasileiros: diretrizes e base metodológica*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo (USP), 2003. 258 p.
- SOARES, R. S. *Coeficiente de distribuição (K_d) de metais pesados em solos do Estado de São Paulo*. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2004. 214 p.
- YONG, R. N. *Geoenvironmental engineering: contaminated soils, pollutant fate and mitigation*. Estados Unidos: CRC Press, 2001. 307 p.

- YONG, R. N.; MOHAMED, A. M. O.; WARKENTIN, B. P. *Principles of contaminant transport in soils*. Amsterdam: Elsevier, 1992. 327 p.
- YONG, R. N.; MULLIGAN, C. N. *Natural Attenuation of Contaminants in Soils*. Estados Unidos: CRC Press, 2004. 319 p.
- ZACHAR, D. *Soil erosion*. In: Série Developments in Soil Science, 10. Amsterdam e Nova York: Elsevier Scientific, 982.
- ZUQUETTE, L. V. Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo (USP), 1987. 673 p.
- ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N. *Cartografia Geotécnica*. São Paulo: Oficina de Textos. 190 p.