

MECANISMOS INDUTORES DE PROGRESSO TÉCNICO
NA AGRICULTURA:
ELEMENTOS DE UMA ABORDAGEM EVOLUCIONÁRIA¹

*Ademar Ribeiro Romeiro*²

RESUMO

O objetivo deste trabalho é abrir a caixa-preta científica e tecnológica da agricultura de modo a mostrar como alguns dos processos físicos e bioquímicos básicos no interior do complexo solo-planta têm-se constituído em importantes “mecanismos indutores e objetos focalizados” na dinâmica do processo inovativo. A especificidade ecológica do processo produtivo do setor agrícola torna-o ainda mais complexo e interdependente do que aqueles do setor industrial, envolvendo uma quase compulsiva formulação de problemas. São estes problemas, por sua vez, que têm balizado, em grande medida, a pesquisa e o desenvolvimento das chamadas práticas agrícolas modernas, bem como a busca de alternativas. O processo produtivo agrícola baseia-se num ecossistema muito complexo, que reage às intervenções a que é submetido. Estas reações têm que ser controladas de modo a obter os resultados almejados pelos agricultores. Assim, elas têm tido papel muito importante na coordenação das atividades de pesquisa das diversas fontes de inovação da agricultura (indústrias, institutos de pesquisa, etc.), o que bem explica a convergência das diferentes trajetórias tecnológicas que contribuíram para a definição do atual regime tecnológico na agricultura.

INDUCING MECHANISMS OF TECHNICAL PROGRESS IN AGRICULTURE:
EVOLUTIONARY APPROACH ELEMENTS

ABSTRACT

The object of this paper is to open the scientific and technological “black box” of the agricultural sector in order to show how some basic physical and biochemical processes inside the soil-plant complex play an important role as “inducement mechanisms and focusing devices” in the innovation dynamics. The ecological specificity of the productive process in agriculture makes it much more complex and interdependent than those in the industry, involving an almost compulsive formulation of problems. These problems, in turn, have been very important either in the shaping of the so called modern agricultural practices, as in the

¹ A estrutura básica deste trabalho foi concebida durante nossa permanência, em 1994, como pesquisador visitante junto ao Departamento de Economia e ao Centro de Estudos Latino-Americanos de Stanford, pelo que agradecemos o apoio recebido da CAPES da Comissão Fulbright. Agradecemos também o apoio da FAPESP, responsável pela nossa estada como professor visitante do Instituto de Economia, da UNICAMP, onde encontramos o estímulo para colocar estas idéias no papel.

² Professor do Departamento de Economia da UFF e professor visitante do Instituto de Economia, da UNICAMP.

searching for alternatives. The agricultural productive process is based on a very complex ecosystem, which reacts to the interventions it is submitted. These reactions have to be controlled as to produce the results the farmers are searching for. So, they have played an important role in coordinating the research activities of the different sources of agricultural innovation (industries, public research institutions, etc.). This explain, in large extend, the convergence of the different technological trajectories defining the present technological regime in agriculture.

INTRODUÇÃO

Há quase 30 anos, Rosenberg em trabalho pioneiro³ chamava a atenção para a incapacidade da teoria econômica convencional (neoclássica) em explicar as forças que proporcionam os incentivos para a mudança tecnológica. Neste trabalho são identificadas três categorias de mecanismos que historicamente induziram, com sucesso, às mudanças tecnológicas: a) internos à própria dinâmica tecnológica; b) decorrentes de problemas com a mão-de-obra; e c) causados por reduções drásticas na oferta de insumos para os quais não existem substitutos. As duas últimas categorias de mecanismos eram óbvias e vinham sendo tratadas, por historiadores economicos sobretudo, desde longa data. A contribuição original de Rosenberg foi identificar e sistematizar a primeira categoria de mecanismos indutores de progresso técnico.

Na origem desta categoria está a idéia fecunda de que a tecnologia é muito mais um processo cumulativo e com capacidade de autogeração do que os economistas geralmente supunham. A mudança tecnológica não pode ser tratada como algo que se ajusta passivamente às pressões e aos sinais das forças econômicas, mediadas através do mercado e dos preços dos fatores em particular. Não há dúvida de que os incentivos para a mudança tecnológica são sempre de natureza econômica em última instância, mas exatamente por serem de caráter difuso e geral, eles não são capazes de explicar muito bem as características de uma seqüência particular, bem como o “timing” de determinada atividade inovativa. Seu argumento básico é de que “a maior parte dos processos produtivos mecânicos emitem sinais que são compulsivos e bastante óbvios (...) processos estes que quando suficientemente complexos e interdependentes, envolvem uma quase compulsiva formulação de problemas (...) problemas sobre os quais vão se debruçar aqueles que estão

³ Rosenberg, N. **The direction of technological change**: inducement mechanisms and focusing devices. In: *ECONOMIC Development and Cultural Change*, 1968. Republicado em Rosenberg (1976).

engajados na busca de melhores técnicas” (Rosenberg 1976: p.111). Em trabalhos subseqüentes, esta idéia será desenvolvida procurando-se abrir, em inúmeros estudos de caso, o que até então era tratado como uma ‘caixa-preta’ científico-tecnológica.⁴

No caso do setor agrícola, a influência desta nova perspectiva aberta por Rosenberg faz-se sentir em vários estudos, em que são analisadas as conseqüências do ponto de vista da dinâmica de inovações, de certos desequilíbrios tecnológicos mais evidentes como, por exemplo, os efeitos da mecanização da colheita e do uso intensivo de fertilizantes químicos na pesquisa genética para seleção de variedades mais adequadas ou aquelas da baixa resistência a doenças das novas variedades de alta capacidade de resposta à fertilização química (HYV) sobre a pesquisa de novas formas de controle de pragas. No entanto, no caso das principais abordagens, neoclássica e marxista, que procuram explicar as trajetórias tecnológicas que caracterizam o processo de modernização agrícola, esta categoria de mecanismos indutores de progresso técnico não é devidamente explorada. Os argumentos da primeira, o modelo de inovações induzidas⁵, se enquadram basicamente nas duas outras categorias de mecanismos indutores. As diferenças dos preços da terra e do trabalho explicariam, por exemplo, as diferenças nas trajetórias tecnológicas das agriculturas americana e japonesa, trajetórias estas simplisticamente definidas em função do viés poupador de fatores de produção. A abordagem marxista, embora seja mais completa ao levar em conta certos mecanismos que poderiam ser enquadrados nesta primeira categoria, ainda assim apresenta uma visão excessivamente genérica, comum às suas várias subcorrentes, as quais privilegia o papel de uma lógica capitalista no sentido de impor um padrão de mudança tecnológica que lhe seja de acordo: desqualificação do trabalhador, redução do custo de reprodução da força de trabalho urbano-industrial, controle das forças da natureza, etc.⁶

Por razões ecológicas, o processo produtivo no setor agrícola apresenta um grau de complexidade e interdependência muito maior do que os processos produtivos mecânicos e que, portanto, envolvem uma forte “compulsividade” na formulação de problemas a serem resolvidos, os quais tem um papel fundamental na definição, tanto do que deveriam ter sido as trajetórias

⁴ Ver Rosenberg (1982, 1994) e Kleine & Rosenberg (1986).

⁵ Este modelo foi formulado pela primeira vez por Hayami & Ruttan (1971), em trabalho que revisto e ampliado em 1985. Para uma resenha deste último ver Romeiro (1988).

⁶ Para uma crítica a estas abordagens, ver Romeiro (1991, 1992).

tecnológicas de um processo de modernização agrícola que levasse em conta a sustentabilidade ecológica, quanto daquelas trajetórias efetivamente seguidas. O processo produtivo agrícola está calcado num complexo ecológico que inter-relaciona solo/planta/clima, e que evolui em função das intervenções a que é submetido. Devido a esta especificidade ecológica do processo produtivo agrícola, envolvendo uma complexa cadeia de seres vivos em equilíbrio dinâmico através de relações de complementaridade e simbiose, as intervenções humanas com a finalidade de melhorar a produção provocam variadas seqüências de reações que têm que ser controladas e direcionadas de modo que se obtenham os resultados desejados. O que se pretende, portanto, é abrir a caixa-preta científica e tecnológica da agricultura, de modo a mostrar os processos básicos que dão origem a essas seqüências de reações, as quais se configuram como importantes “mecanismos indutores e os objetos focalizadores”, os quais vêm balizando, em grande medida, a pesquisa e o desenvolvimento de novas técnicas agrícolas nas últimas décadas.

ABRINDO A CAIXA-PRETA

Nesta abertura da caixa-preta da produção agrícola não se pretende evidentemente fazer uma análise completa de todos os aspectos envolvidos, mas tão-somente identificar alguns dos mecanismos básicos que regulam as reações físico-químicas e biológicas no complexo solo-planta de modo a iluminar as causas das seqüências de reações que ocorrem em função das atividades agrícolas. Desse modo torna-se possível apreender os mecanismos indutores de uma série de soluções técnicas destinadas, simultaneamente, a manter o equilíbrio do sistema e a aumentar a eficiência da produção agrícola. Torna possível também mostrar como a violação de determinados princípios ecológicos provoca seqüências de reações adversas que têm que ser neutralizadas, dando origem a uma outra série de soluções técnicas, o que explica em grande medida a convergência das diversas trajetórias tecnológicas que definem o atual regime tecnológico na agricultura.

ECOLOGIA DO COMPLEXO SOLO-PLANTA⁷

O solo

Entre os fatores que condicionam a fertilidade de um solo, sua estrutura física é primordial. O papel do estado estrutural do solo é absolutamente fundamental na medida em que permite um bom desenvolvimento das raízes, boa circulação do ar, retenção de água; enfim, as condições adequadas às atividades microbiana e racinaria. A estrutura do solo depende, por sua vez, de sua textura; isto é, do conjunto de propriedades que resultam diretamente do tamanho de suas partículas constituintes⁸. Mas, como observam Mounnier & Stengel (1982), a composição granular não é o único fator determinante destas propriedades; é preciso considerar também os teores de calcário e de matéria orgânica, que influem na composição iônica do solo e na natureza mineral de seus constituintes. O conceito de textura corresponde simultaneamente ao papel atribuído a cada uma das frações granulométricas na configuração de características físicas diversas (facilidade de aquecimento, permeabilidade, resistência aos instrumentos aratórios, etc.) e ao comportamento do solo diante de fatores aleatórios ao longo do calendário agrícola (tendência à compactação sob a ação da chuva, sensibilidade ao gelo, etc.).

Em função da composição granulométrica do solo, será mais ou menos fácil de obter uma estrutura favorável e estável. O fator crucial é a proporção existente entre os elementos inertes e os “cimentos” que são os colóides minerais. Mais simplesmente, como dizia Brousse (1947) nos anos 40, é preciso que haja uma boa proporção entre areia e argila. A primeira contribui para a permeabilidade e leveza do solo e a segunda, ao contrário, para sua impermeabilidade e poder de agregação. A argila possui propriedades coloidais devido a extrema fineza de seus grânulos. Assim, segundo Duthil (1971), a análise granulométrica, apesar das limitações dos métodos empregados, é absolutamente fundamental para determinar a fertilidade de um

⁷ Para uma discussão mais detalhada deste tópico, ver Romeiro (1992), versão revista e modificada da tese de doutoramento apresentada na Escola de Altos Estudos em Ciências Sociais, Paris.

⁸ A classificação do solo segundo o diâmetro de suas partículas constituintes é a seguinte: menos de 2 μ = argila; entre 2 μ e 20 μ = silte; entre 20 μ e 50 μ = limo grosseiro; entre 50 μ e 200 μ = areia fina; entre 200 μ e 2mm = areia grossa; entre 2mm e 20mm = pedregulhos; mais de 20mm = pedras.

solo; infinitamente mais fecunda, segundo ele, do que a dosagem dos elementos químicos.

Quanto ao calcário, ele pode ser classificado, segundo o diametro de seus grânulos, na categoria dos colóides minerais (menos de 2μ) ou nas demais categorias. Seu papel apresenta um duplo interesse: ele intervém nos fenômenos físico-químicos envolvendo os colóides do solo através do aporte de um cátion notável, bem como pode atuar como elemento granulométrico capaz de se associar a outros para formar agregados. Portanto, o calcário melhora a qualidade dos cimentos minerais⁹ responsáveis pelos agregados de solo e, por conseguinte, sua própria estrutura física. Não é necessário um teor elevado de calcário para obter estes efeitos (0,5% a 5%), desde que se trate de calcário ativo. O teor total de calcário não significa grande coisa. O que importa é o grau de reatividade deste. Entretanto, seu excesso provoca alterações anormais na matéria orgânica, perturba a circulação do ar em presença de umidade, torna o solo aderente aos instrumentos e, o mais importante, dificulta a assimilação de certos elementos pela planta, na medida em que a maioria dos sais são pouco solúveis em pH inferior à neutralidade.

Finalmente, no que concerne aos constituintes orgânicos do solo, seu papel é desproporcionalmente importante vis-à-vis ao seu peso (1% a 3%) no conjunto de constituintes. Eles estão presentes normalmente em três formas distintas, segundo o grau de transformação biológica: 1. resíduos frescos não decompostos; 2. substâncias complexas mas definidas e individualizadas (proteínas, hidratos de carbono, ceras, etc.), provenientes tanto da decomposição avançada dos resíduos orgânicos, como de ressínteses microbianas a partir de elementos minerais; 3. substâncias húmicas propriamente ditas, que resultam de uma fase de decomposição mais avançada. Nas duas primeiras formas a matéria orgânica está livre, isto é, não tem ligação íntima com os constituintes minerais do solo. Na ultima forma ela se encontra intimamente ligada especialmente à argila (ver Guerif 1982). A evolução da matéria orgânica no solo (o ciclo carbono) é um ciclo multiforme: sob a ação de microrganismos, alguns elementos evoluem na direção de moléculas cada vez mais complexas para chegar à forma de húmus, enquanto outros tipos de fermentações provocam a aparição de radicais simples, de elemen-

⁹ Os principais colóides minerais do solo são as argilas mineralógicas, os hidróxidos de ferro e os hidróxidos de alumínio. Estes dois últimos são praticamente os únicos colóides eletropositivos do solo (se comportando como captadores de ânions nutritivos).

tos minerais. Humificação e mineralização são fenômenos simultâneos e interdependentes.

Desde longa data vem se realizando estudos visando a explicar os mecanismos de ação do húmus no solo. A dificuldade principal é explicar a ligação estreita que o húmus, que é um colóide eletronegativo, mantém com a matéria mineral do solo (argila), também um colóide eletronegativo, formando o complexo chamado argilo-húmico. A acumulação do húmus no solo é um processo lento. A fertilidade natural dos solos ligada ao teor de húmus resulta de séculos, ou mesmo milênios, de acumulação. Kovda (1977) estima que a energia acumulada no húmus dos solos do mundo inteiro é igual ou superior à energia acumulada na biomassa da superfície. Um solo bem provido de um complexo argilo-húmico certamente terá uma estrutura física ideal (grumosa). A formação desta associação argilo-húmica não ocorrerá, no entanto, em solos excessivamente ácidos mal arejados; nestes casos a presença de compostos orgânicos agressivos e solúveis provocam uma verdadeira varredura dos horizontes superficiais, levando com eles os cátions presentes.

O desaparecimento de silicatos, desagregados por substâncias agressivas e levadas em profundidade, do mesmo modo que os cátions, pode deixar também um vazio difícil de reparar. Uma simples calagem, mesmo efetuada nas melhores condições, não será suficiente para reverter este quadro. Como foi dito, a formação do húmus é um processo lento e progressivo, de modo que suas lacunas não são facilmente reparáveis. É preciso tempo para transformar simultaneamente os processos biológicos e a qualidade das matérias húmicas elaboradas. Isto explica a noção tradicional nas sociedades camponesas “de cultura de bom pai de família.”

Por sua vez, a excelência das propriedades coloidais do húmus varia segundo a natureza dos compostos húmicos. Por exemplo, os ácidos húmicos observados nos famosos solos negros da Ucrânia (chernozem) tendem a formar com as argilas agregados pequenos e extremamente resistentes. Num solo bem equilibrado, a alternância de períodos secos e úmidos acentua a coagulação dos compostos húmicos e torna a floculação mais estável. O conjunto de propriedades do húmus faz com que ele cumpra o papel de “colóide protetor” da argila coloidal à qual ele se associa, tornando o solo notavelmente resistente à erosão. Outra característica notável do húmus é sua hidrofilia acentuada (um gel húmico pode reter cerca de 15 vezes seu volume em água), fazendo o solo funcionar como uma esponja, um reservatório de água disponível para as plantas. Em solos desprovidos de colóides

minerais (solos arenosos), a elevação do teor de húmus é capaz de compensar esta carência¹⁰, o que explica cientificamente a preocupação dos agricultores tradicionais em retornar a matéria orgânica aos solos com o objetivo de melhorar suas qualidades físicas.

Entre os principais fatores que determinam a fertilidade física de um solo é preciso acrescentar ainda a fertilidade potencial da rocha-mãe e o nível de atividade biológica (ver Pedro, 1982). Esta última é particularmente eficaz do ponto de vista da microestrutura. O termo estrutura crogênica tem sido inclusive utilizado por diversos autores a propósito de solos extremamente bem estruturados, nos quais as dejeções da microfauna cumprem um papel decisivo no fenómeno de granulação. Uma nova ciência tem se desenvolvido, a pedobiologia, como resultado da tomada de consciência da importância da atividade dos microrganismos no interior dos solos. As complexas interações eletrostáticas, químicas e biológicas no solo resultam no que foi chamado de “atividade estrutural”, isto é, sua aptidão de evoluir naturalmente para uma configuração estrutural favorável. Enfim, como já notava Russel (1912: p.75) no início do século, a estrutura de um solo não resulta da mera justaposição dos seus diversos elementos constituintes, mas de sua interação complexa que dá origem a um novo material com características próprias.

Do ponto de vista agronômico, as principais características de um solo com boa estrutura são a porosidade e a coesão, que o tornam permeável e arejado como a areia, mas, ao contrário desta, estável e capaz de reter a água contra a gravidade. A porosidade do solo é classificada em micro e macroporosidade. Os microporos são os responsáveis pela retenção da água (por capilaridade) determinando, portanto, a capacidade de campo do solo¹¹; os

¹⁰ No entanto, se por um lado, a matéria orgânica “engorda” os solos arenosos, por outro, ela “emagrece”, tornando mais leves os solos excessivamente argilosos. Segundo Duthil (1975: tomo II, p.142), este papel aparentemente contraditório da matéria orgânica justifica o antigo adágio camponês, que diz: “O húmus dá consistência as terras ligeiras e torna leves as terras fortes.”

¹¹ Definição de ‘capacidade de campo’, segundo Henin et al. (1969: p.32): “Volume de água retido por unidade de volume de solo, medido em solo saturado com toda água excedente drenada”. A capacidade de retenção de água de um solo depende do que determina sua microporosidade, que Boiffin & Mounnier (1982) chamam de ‘espaço poral estrutural’, isto é, seu teor de elementos finos, e particularmente seu teor de colóides minerais e orgânicos; são as variações do teor dos colóides orgânicos que são passíveis de ser manipuladas para melhorar a circulação da água e o desenvolvimento do sistema radicular. Num solo arenoso pobre em colóides minerais, a manutenção de uma taxa elevada de matéria orgânica pode compensar

macroporos, por seu turno, são os responsáveis pela circulação do ar. A importância da porosidade do solo na produção vegetal deu origem a uma nova especialidade: a porometria.

Parece claro, portanto, a partir do que foi visto até agora, que o preparo do solo para o cultivo deve obedecer a critérios ecológicos bem definidos de modo a garantir uma boa configuração de sua estrutura física¹². Existem solos de excepcional estrutura física natural que podem ser cultivados diretamente sem nenhum preparo. Trata-se de solos raros, com estrutura granulométrica bem equilibrada, com alto teor de matéria orgânica e intensa atividade biológica. A maior parte dos solos necessita, no entanto, da intervenção humana para apresentar as condições necessárias ao cultivo. O tipo de intervenção correta é aquela que procura corrigir as deficiências naturais do solo, de modo a aproximar sua estrutura daquela ideal. Nas regiões de clima mais quente, especialmente as tropicais, a técnica de plantio direto é extremamente eficiente. Esta técnica consiste basicamente na incorporação superficial (cerca de 5cm) dos restos de cultura, bem triturados, de modo a proteger o solo da ação dos fatores erosivos e ativar sua atividade biológica. Nestas condições ocorre um processo de estruturação natural (biológico) do solo, que tem suas partículas agregadas em grumos estáveis, com alta capacidade de absorção e retenção de água, ao mesmo tempo em que permitem a livre circulação do ar. Trata-se, portanto, de uma maneira inteligente de jogar com as forças da própria natureza para a obtenção das condições estruturais ideais e garantir a sustentabilidade.

A NUTRIÇÃO VEGETAL

Um solo bem estruturado, portanto, oferece as condições ideais ao desenvolvimento das plantas. No entanto, a prática da agricultura intensiva, demandando fortemente nutrientes do solo que são “exportados” (para as cidades) e não retornam, exige o aporte sistemático de um complemento de nutrientes químicos de fontes exógenas. Mas este aporte deve ser feito de modo a não perturbar o complexo e delicado equilíbrio bioquímico do solo.

totalmente esta deficiência, a ponto de eliminar as diferenças entre solos arenosos e argilosos no que concerne à capacidade de retenção de água.

¹² De acordo com Brousse (1947: p.4), “as propriedades físicas do solo dominam todas as demais, pois elas condicionam as reações químicas e os fenômenos”. Ele chega mesmo a considerar inútil colocar fertilizantes num terra com mau estado estrutural.

Os principais nutrientes demandados são os chamados macronutrientes primários: nitrogênio, fósforo e potássio (NPK).

O nitrogênio é o principal componente mineral das plantas (especialmente sob a forma de proteínas), depois do oxigênio, do carbono e do hidrogênio. O teor de nitrogênio nas plantas (em peso de matéria seca) varia de 1% a 3%. Ele se apresenta sob duas formas minerais: amoniacal e nítrica. Esta última forma tende a predominar nos solos com boa estrutura física e de vida microbiana intensa. A amônia é diretamente assimilada pela planta, enquanto os nitratos não, devendo passar antes por uma redução. A maioria das transformações sofridas pelo nitrogênio na biosfera (o ciclo do nitrogênio) é de origem microbiana. A importância agronômica destas transformações é enorme, pois estas regulam o balanço do nitrogênio no solo e sua disponibilidade para as plantas sob as formas minerais – as únicas assimiláveis.

As principais fontes naturais de nitrogênio são o estoque de matéria orgânica dos solos e a fixação de nitrogênio atmosférico por microrganismos. Além destas fontes, existem pequenos ganhos de nitrogênio carreados pelas chamadas “águas meteorológicas” (águas de chuva carregadas de N provenientes da poluição industrial ou de reações químicas na atmosfera provocadas por descargas elétricas). Há também as hipóteses de fixação fotoquímica e através de colóides orgânicos.

No que concerne à fixação de nitrogênio atmosférico por microrganismos, a quantidade fixada depende do nível de atividade microbiana no solo e da quantidade de fertilizantes nitrogenados presente. A fixação de N prossegue até que seja atingido um certo ponto de equilíbrio. O uso de fertilizantes nitrogenados inibe, portanto, a fixação atmosférica. Quanto maior, por outro lado, a presença de uma microflora imobilizando ativamente o N presente, maior será a fixação. A associação entre culturas grandes consumidoras de N (gramíneas, por ex.) e culturas produtoras de N (leguminosas), também produz este efeito de aumentar a taxa de fixação de N atmosférico.

Quanto ao estoque de matéria orgânica no solo, este contém cerca de 1/20 de seu peso em nitrogênio. Na França, por exemplo, os solos contêm entre 50 a 100 toneladas de matéria orgânica por hectare (2,5 a 5 toneladas de N orgânico), que se mineraliza a taxas que variam de 1% a 3% ao ano, em função da população microbiana e de fatores ecológicos. Desse modo, considerando estas taxas de mineralização, são liberados ao longo de cada ano de 25 a 150 kg/ha de N. Boa parte do nitrogênio orgânico é composto de proteínas (30% a 50%), de ácidos nucléicos (3% a 10%) e de aminoaçúcares (5% a 10%), que são substâncias facilmente degradáveis em estado puro. No

entanto, elas se encontram nos solos sob a forma de complexos protéicos mais resistentes à mineralização, constituindo-se, assim, numa reserva alimentar de ação lenta e progressiva. A vantagem em relação aos fertilizantes químicos purificados é assegurar uma nutrição mais equilibrada de acordo com as necessidades da planta, progressivamente à medida que esta se desenvolve. Além desta, existe a vantagem de este nitrogênio complexificado não estar sujeito à lixiviação.¹³

A passagem do nitrogênio orgânico para a forma mineral processa-se em duas etapas distintas: a amonificação, que libera amônia e, em seguida, a nitrificação, que oxida a amônia transformando-a em nitratos. O processo de nitrificação é influenciado por certos fatores, como o nível de oxigenação, o grau de umidade e o pH do solo, a forma do fertilizante nitrogenado empregado e o tipo de vegetação. Uma fertilização química desequilibrada perturba muito este processo. Por exemplo, o excesso de amônia pode bloquear todo o processo de nitrificação ou uma das suas fases, fazendo com que se acumule nitritos tóxicos¹⁴; o excesso de potássio, por seu turno, favorece o fenômeno de retrodegradação da amônia que retarda ou inibe a nitrificação. Ocorrem também as perturbações provocadas pelo uso de pesticidas (alguns deles funcionam como inibidores) e pela ação de substâncias inibidoras da nitrificação, que são deliberadamente colocadas na tentativa de reduzir as perdas de nitrogênio através da desnitrificação¹⁵ ou do consumo excessivo pelos vegetais.

Ao processo de mineralização da matéria orgânica opõe-se o processo inverso de reorganização (no caso do N, chamado de ciclo interno). A microflora telúrica utiliza o N mineral para sintetizar suas próprias populações (em competição com os vegetais cultivados). Com a morte destes microrganismos o nitrogênio assim imobilizado é liberado, tornando-se disponível para as plantas. Em cada momento, de acordo com a intensidade de cada um

¹³ Como veremos mais adiante, a indústria de fertilizantes tem procurado desenvolver novas formas de fertilizantes nitrogenados com liberação progressiva (fertilizantes 'a retardamento'), mas seu custo é muito elevado.

¹⁴ Na França, a taxa de nitratos nos lençóis freáticos, em muitas regiões, sobretudo nas regiões de grandes monoculturas de cereais, atingiu níveis críticos e perigosos (ver Noirfalise (1974)).

¹⁵ A desnitrificação química ou biológica pode fazer regredir o NO_3 até a forma de N gasoso, o que leva a uma perda por volatilização. Quanto pior a estrutura física do solo, maior a desnitrificação. É por esta razão que a adição de inibidores químicos da desnitrificação são empregados nas práticas agrícolas ditas modernas, por causa da degradação da estrutura física do solo decorrente da desnitrificação.

destes processos, haverá mineralização líquida ou reorganização líquida¹⁶. A coexistência destes ciclos internos e externos do nitrogênio, provocados pela proliferação simultânea de microrganismos com tipos de atividades opostas, indica que o nível de N mineral no solo tende a se modificar ao longo do ano. Foi verificado que em solos com boa estrutura física (portanto, bem drenados e oxigenados), nível de acidez e teor de matéria orgânica normais, a tendência é de que ocorra mineralização líquida. É preciso considerar também a relação carbono/nitrogênio da matéria orgânica. Quanto maior a proporção C/N, maior será a reorganização líquida e vice-versa, desde que as frações carbonadas e nitrogenadas sejam suscetíveis de ser mineralizadas mais ou menos na mesma velocidade.

Por ser um ânion, isto é, um íon que não é retido pelo poder fixador do solo, o nitrogênio apresenta um problema específico de fertilização para o agricultor: estar presente quando a planta precisar. Por esta razão recomenda-se o aporte fracionado de nitrogênio comercial para evitar o desperdício e minorar os problemas ambientais. No entanto, o aporte fracionado sozinho não é capaz de evitar os problemas. Neste sentido, a manutenção de um teor adequado de matéria orgânica no solo é duplamente importante: não apenas como fonte de nitrogênio para a planta, para reduzir a necessidade de aportes exógenos, como também como base da atividade biológica do solo capaz de capturar o excesso de N.

O segundo macronutriente primário mencionado, o fósforo, da mesma forma que o nitrogênio, cumpre um papel “plástico”, isto é, de constituinte da matéria viva vegetal. Mais importante ainda é seu papel no metabolismo dos organismos vegetais: a reprodução e integridade das células, cujo crescimento depende fundamentalmente do fósforo e de seus componentes diversos. Em seu papel essencial de acumulador de energia (ATP), o fósforo intervém em todos os fenômenos anabólicos e catabólicos. A disponibilidade do fósforo para as plantas naturalmente contido no solo depende da atividade microbiana. Em primeiro lugar está o fósforo liberado pela mineralização da matéria orgânica, cuja quantidade não é grande, mas muito eficaz na nutrição vegetal por ser diretamente assimilável e na medida das necessidades da planta. Da mesma forma que no caso do N, coexistem processos simultâneos de mineralização e de reorganização do fósforo. A relação carbo-

¹⁶ O uso de pesticidas também afeta o equilíbrio destes processos, na medida em que tem uma ação brutal na microvida do solo (ver Chambon 1982).

no/fósforo também influi neste balanço, sendo admitido que ocorra mineralização líquida quando a relação C/P é inferior a 200.

Em segundo lugar está o fósforo mineral presente no solo, mas não disponível para as plantas. Este fósforo é solubilizado por microrganismos, que o tornam disponível para os vegetais. Quanto maior o nível de atividade biológica no solo, mais intenso este processo de solubilização do fósforo. Esta solubilização ocorre por meio de dois mecanismos: por reações entre o fosfato insolúvel e os produtos do metabolismo microbiano ou por assimilação direta do fosfato insolúvel por microrganismos que o restituem em seguida sob a forma solúvel. Diferentemente do nitrogênio, o fósforo é um elemento fortemente retido pelo poder fixador do solo. Diversos experimentos com fósforo radioativo mostraram que os íons fortemente fixados difundem-se a distâncias muito curtas (da ordem de 2 a 3 mm). Por esta razão, um bom desenvolvimento das raízes dos vegetais é fundamental e depende das condições estruturais do solo. Carências de fósforo podem, portanto, resultar de deficiências na estrutura física de um solo. É interessante notar, por outro lado, que os solos bem estruturados apresentam um forte poder absorvente mas, ao mesmo tempo, propiciam as condições necessárias para que haja o contato direto das raízes com as partículas de solo contendo fósforo. Através deste contato direto os íons PO_4 passam do solo para o vegetal.

Finalmente, o terceiro macronutriente primário citado, o potássio, ao contrário dos dois anteriores, não é um elemento plástico propriamente dito. Seu papel principal é de um indispensável regulador fisiológico, intervindo na permeabilidade das membranas. Ele participa também em diversos sistemas enzimáticos. Suas fontes naturais são a matéria orgânica e o que está contido em forma mineral no solo (cerca de 3,2% em média). O potássio contido na matéria orgânica é facilmente liberado para as plantas através da mineralização. O potássio contido nos minerais primários ou secundários (argilas mine-ralógicas) não é imediatamente acessível pelas plantas. Em solos jovens, a decomposição natural dos minerais primários pode ser suficiente para as necessidades das culturas. Mesmo em solos mais estáveis, as raízes das plantas são capazes de extrair uma parte do potássio desagregando as argilas minerais química, eletrostática e microbiologicamente. Foi demonstrado também que diversas bactérias são capazes de solubilizar os elementos contidos em certos silicatos, através da produção de ácidos minerais e orgânicos. Parte deste potássio é utilizada no metabolismo interno das bactérias e é liberada para as plantas após a morte destas.

O potássio também é retido pelo poder fixador do solo, mas com uma capacidade de difusão maior do que a do fósforo (cerca de 5 a 6mm). Ainda assim um bom desenvolvimento radicular é fundamental para o aproveitamento de todo o potencial em potássio oferecido pelos solos. As perdas de potássio por lixiviação são relativamente pequenas. A maior parte deste que é carregada pelas águas da chuva permanece no subsolo ao alcance das raízes das plantas com desenvolvimento radicular normal. Obviamente quanto melhor estruturado o solo menor será a perda. Uma das principais causas das carências de potássio decorrem de desequilíbrios químicos provocados pelo aporte de fertilizantes e corretivos. Por exemplo, o excesso de calcário e sobretudo de magnésio provoca carências de potássio (e vice-versa, um excesso de potássio provoca carências de Ca e Mg).

Além dos macronutrientes primários existe os chamados micronutrientes e, entre os dois tipos, um tipo intermediário. A este último tipo (nutrientes secundários) pertencem o enxofre (S) e o magnésio (Mg). Juntamente com o nitrogênio e o carbono, o enxofre constitui um dos principais componentes da matéria orgânica, além de cumprir também um papel de agente catalítico em múltiplas etapas do metabolismo vegetal e participa de numerosos sistemas enzimáticos. O balanço entre os processos de mineralização e reorganização depende também de muitos fatores. Em primeiro lugar depende da relação carbono/enxofre. Para que ocorra mineralização líquida, esta relação deve se situar entre 100 a 300. O aporte de carbonato de cálcio estimula a formação de sulfatos, na medida em que favorece os processos microbianos de mineralização. Em segundo estão o grau de umidade e a temperatura: temperaturas elevadas e baixa umidade estimulam a mineralização e vice-versa na reorganização. Segundo Duthil (1973b), as carências de enxofre observadas na França têm sido provocadas pelo abandono da criação animal integrada com as culturas e pela prática da queima das palhas. Além, é claro, das monoculturas de espécies “famintas” de enxofre sem a fertilização adequada. Por outro lado, o excesso de fertilizantes sulfatados tem provocado a salinização e a intoxicação por cloro.

Quanto ao magnésio, este elemento situa-se na fronteira entre os macro e os microelementos. Ele tem um papel plástico fundamental, pois é o único elemento mineral presente na clorofila. Ele cumpre também um papel de agente catalítico, participando em múltiplos sistemas enzimáticos. No solo ele é liberado facilmente pela mineralização da matéria orgânica. Outra fonte natural é sua liberação pelo processo de formação de solos. Há também alguns ganhos de origem diversa carregados pelas águas das chuvas (5 a

15 kg por ha ao ano). Estas fontes naturais são normalmente suficientes para as culturas, de modo que a carência absoluta de magnésio é rara. No entanto, devido à forte ação antagonista que o Mg exerce em relação a outros cátions, ocorrem com frequência carências relativas induzidas pelo excesso relativo de outro elemento. Os desequilíbrios minerais que induzem às carências mais freqüentes e mais graves de Mg são provocados, por sua vez, pela má estrutura física dos solos. Também a acidez provocada pelos sulfatos, os sais amoniacais, etc., contidos nos fertilizantes químicos, tendem a acentuar as carências de Mg. Por sua vez, o esforço para contornar este problema através do aporte de magnésio industrial encontra dificuldades, pois é difícil calcular a dosagem correta e seu excesso tem um efeito depressivo muito rápido sobre a produtividade.

Quanto aos micronutrientes, existem pelo menos sete indispensáveis à nutrição vegetal: ferro, manganês, zinco, cobre, boro, molibdênio e cloro. Há outros elementos também benéficos em pequenas doses, mas ainda não está provado seu caráter indispensável: sódio, cobalto, iodo, alumínio e silício. Dado que estes elementos participam da nutrição vegetal em quantidades muito pequenas, as carências absolutas são raras. A decomposição da rocha-mãe seria suficiente, de modo geral, para suprir as necessidades das plantas (com a excessão do cloro, trazido pelas chuvas). Este tipo de carência pode ocorrer em certos tipos de solos formados a partir de granitos, em solos excessivamente arenosos, em solos turfosos ou em solos muito erodidos (ver Quemener & Loison 1985). Mas as carências mais freqüentes são aquelas relativas, provocadas pela má estrutura física do solo, pelo excesso de umidade e acidez, por fertilizantes e corretivos e por pesticidas. O excesso de micro-elementos provoca, por seu turno, problemas de toxidez.

Duthil (1973b) observa que a multiplicação recente dos estudos a respeito do papel dos microelementos não se deve apenas a uma melhoria nos métodos de pesquisa, mas principalmente também à multiplicação dos casos de carências provocadas pelas práticas agrícolas convencionais, as quais favorecem o desequilíbrio alimentar. O uso de fertilizantes químicos tornou-se cada vez mais intensivo, ao mesmo tempo em que se abandonou a criação animal (e o uso do esterco) e os restos de cultura são queimados ou vendidos pelo agricultor. São realizadas calagens pesadas que, ao elevar bruscamente o pH, podem bloquear certos elementos, provocando carências, ou liberar excessivamente outros, provocando toxidez. Em certos casos, uma fertilização intensiva à base de NPK pode provocar carências de micronutrientes devido a um antagonismo iônico do tipo fósforo/zinco. O uso de pesticidas

também pode provocar carências ou toxicidade. Solos compactados (pela passagem excessiva de máquinas pesadas ou por irrigação malfeita) também estão sujeitos a apresentar problemas de assimilação de micronutrientes. Finalmente, existe o problema de difícil diagnóstico, que é a subcarência. Esta é difícil de ser identificada porque não produz sintomas visuais nas culturas e é provocada, em geral, pelo excesso de fertilização química. Por outro lado, a aplicação preventiva sistemática de micronutrientes, sem o diagnóstico específico, não é possível por causa das estreitas margens dos níveis ótimos de concentração. Em síntese, do ponto de vista dos micronutrientes o equilíbrio da nutrição vegetal é particularmente afetado pelas práticas agrícolas consideradas como modernas.

Em resumo, uma fertilização química equilibrada, isto é, que seja eficiente e não provoque desequilíbrios ambientais é impossível obter sem a observação de algumas de regras ecológicas gerais. Como foi visto e, ao contrário do que se pensava nos inícios da química agrícola, a fertilidade química de um solo não é uma simples expressão aritmética da quantidade de elementos minerais¹⁷. O grande problema é saber quais as proporções ideais de nutrientes minerais para uma boa fertilização. Segundo Duthil (1973b), para evitar os erros mais grosseiros, as fórmulas de fertilizantes “balanceadas” são apenas um paliativo, e não muito bom. Lecomte & Riedel (1958) já haviam chamado a atenção de que a noção de fertilização equilibrada só poderia ser aplicada ao meio nutritivo do solo e não às formulações de fertilizantes químicos.

DESEQUILÍBRIOS INDUTORES DAS TÉCNICAS AGRÍCOLAS CONVENCIONAIS

Na natureza, diversidade é sinônimo de estabilidade. Quanto mais simplificado for um determinado ecossistema, maior a necessidade de fontes exógenas de energia para manter o equilíbrio. Um ecossistema agrícola implica forçosamente a simplificação do ecossistema original. Por esta razão é necessário que o homem intervenha permanentemente para mantê-lo estável. Contudo, esta intervenção deve ser feita de acordo com as próprias leis da natureza. Em primeiro lugar, é preciso evitar as simplificações extremas como no caso das monoculturas. A monocultura provoca um profundo desequilíbrio, tanto do ponto de vista da cobertura vegetal (infestações de pragas) como daquele da atividade física, química e biológica do solo.

¹⁷ Ver Romero (1987) para uma análise histórica da pesquisa agrônômica.

Esta simplificação extrema pode ser evitada através da rotação de culturas. Esta prática é um notável meio de manutenção da estabilidade do ecossistema agrícola. Além de reduzir drasticamente o risco de infestação de pragas na cobertura vegetal, as rotações contribuem eficazmente para a manutenção de uma boa estrutura física do solo. O estado do solo em determinado momento resulta de sua história cultural. E as rotações de cultura têm por objetivo primordial modelar esta história num sentido favorável, isto é, no sentido de favorecer as condições de abastecimento de água e nutrientes para as plantas, bem como no de manter a fertilidade do solo a longo prazo (ver Sebillotte & Bourgeois 1978).

Nos sistemas agrícolas simplificados, sobretudo a monocultura de cereais, os fatores desestabilizadores ganham força e obrigam o agricultor a recorrer a técnicas intensivas em energia para manter as condições favoráveis ao desenvolvimento dos vegetais¹⁸. Entretanto, estas soluções técnicas não buscam eliminar as causas do desequilíbrio, mas apenas contornar seus efeitos sobre os rendimentos. Pode-se dizer que as práticas agrícolas ditas modernas repousam cada vez mais na capacidade de moldar uma determinada parcela do solo, para em seguida refazê-la, por meio de uma diversificada panóplia de possantes meios mecânicos e químicos, e implantar uma outra monocultura sem se importar se o efeito da cultura precedente é desfavorável ou não (ver Sebillotte 1982). A eficácia inicial destes meios químicos e mecânicos tornou a grande maioria dos especialistas extremamente otimista, levando-a a supor que os agricultores modernos não mais teriam que se submeter aos princípios básicos da agricultura tradicional, especialmente a rotação de culturas.¹⁹

É interessante notar que desde o início do século já era claro para muitos o desperdício das forças da natureza que as práticas agrícolas “modernas” provocavam: “Por falta de conhecimentos, nós suspendemos ou contrariamos as transformações úteis que ocorrem na terra; nós desperdiçamos, sem dúvida, materiais caros; nós provocamos inclusive reações perigosas ou

¹⁸ Gabel (1979: p.94) tem razão quando afirma que o “trabalho realizado pela diversidade ou complexidade do ecossistema é substituído pelo combustível fóssil no moderno sistema alimentar.”

¹⁹ Por exemplo, no final dos anos 50, Mitchell (1960: p.50) recomendava a eliminação das culturas forrageiras de raízes da rotação sob o argumento de que os efeitos nefastos disto no solo poderiam ser compensados sem problemas com os novos meios mecânicos e químicos à disposição dos agricultores - tratores mais possantes, novos equipamentos de trabalho de solo e herbicidas.

nocivas; nós não aproveitamos o que a natureza nos dá gratuitamente, porque nós não aprendemos a utilizá-la ou a conservá-la"! Zolla (1913: p.93-94). A poluição por pesticidas é o exemplo mais notório de degradação do meio causada por práticas agrícolas concebidas para combater os efeitos (e não as causas) do desequilíbrio causado pela excessiva simplificação do ecossistema agrícola.²⁰

No que diz respeito à estrutura física do solo, nas regiões de agricultura intensiva na Europa, os impactos cumulativos de décadas de agricultura moderna tornaram-se claramente visíveis. Remy & Marin-Lafleche (1976) observam que na França, devido à baixa geral da taxa de matéria orgânica, a estrutura física dos solos tornou-se cada vez mais suscetível à ação de fatores climáticos, bem como a passagem de máquinas e equipamentos pesados. Por outro lado, por causa deste desequilíbrio estrutural dos solos, uma série de procedimentos mecânicos de reestruturação foram desenvolvidos. Entretanto, estes procedimentos exigem a passagem cada vez mais freqüente de engenhos possantes e pesados! Por exemplo, a baixa do teor de matéria orgânica torna necessário um esforço maior de tração²¹ (o que implica máquinas mais possantes e pesadas) para trabalhos profundos de descompactação, que têm forte impacto negativo sobre o solo.²²

Em outras palavras, a degradação da estrutura física do solo provoca uma contradição permanente nas intervenções que visam a modificar favoravelmente as condições de abastecimento de água e nutrientes para as plantas: quanto mais o solo degrada-se, menos pode-se contar com fatores

²⁰ É amplamente conhecido que, além da contaminação dos solos, das águas, dos produtos alimentares, a utilização sistemática de pesticidas provoca reações de defesa nos organismos destinados a ser controlados por eles, o que os torna resistentes aos tratamentos. É preciso então aumentar as dosagens e/ou introduzir novos produtos, num corrida sem fim contra as reações da natureza. Lappe & Collins (1979) estimam que há 30 anos os agricultores americanos empregavam 26.000 toneladas de pesticidas e sofriam um perda de 7% em média antes da colheita. No final da década de 70, o consumo de pesticidas havia se multiplicado por 12 e as perdas, quase dobrado. Baseado em estudos realizados por pesquisadores da Universidade de Cornell em 1978-79, Krummel & Hough (1980) afirmam que o fim repentino do uso de pesticidas provocaria um aumento de apenas 9% nas perdas por pragas, tal o nível de ineficácia dos tratamentos químicos. No caso dos países tropicais, o problema seria mais grave ainda, pois, segundo alguns pesquisadores, o emprego de venenos estaria transformando sistematicamente espécies inofensivas em novas pragas. Ver a respeito, Paschoal (1983b) e Goldsmith (1980).

²¹ De acordo com Pimentel (1981), a baixa do teor de matéria orgânica no solo pode até dobrar a quantidade de energia necessária para arar em profundidade.

²² Ver a respeito, Remy & Marin-Lafleche (1976), Trypin (1977) e Reboul (1978).

naturais para obter as condições necessárias para o cultivo, as quais têm que ser obtidas por meio de intervenções químico-mecânicas, elas próprias degradantes. Nas regiões tropicais estes problemas são fortemente agravados pela erosão (ver Shiki 1984). Toda uma série de inovações foram introduzidas com o intuito de aumentar o número de dias de trabalho disponíveis, permitindo que o agricultor enfrente melhor a distribuição menos equilibrada do trabalho ao longo do calendário agrícola e diminuindo os riscos de trabalhar solos cujo estado estrutural é cada vez pior. No entanto, é preciso ter claro que estas inovações não resolvem esta contradição, na medida em que se destinam a contornar os efeitos da degradação do meio nos rendimentos, sem tocar nas causas dos problemas.²³

No que concerne aos meios químicos introduzidos para contornar os efeitos nefastos da degradação do meio, existe em primeiro lugar as matérias ativas, já mencionadas, utilizadas para controlar o parasitismo crescente que resulta da monocultura (fenômeno da aquisição de resistência aos diversos produtos). Estas matérias ativas perturbam enormemente a atividade biológica no interior dos solos, já afetada pela baixa da taxa de matéria orgânica e o excesso de trabalho mecânico, o que provoca, entre outros problemas, dificuldades na realização de uma fertilização equilibrada, particularmente no que se refere ao nitrogênio (ver Reboul 1977). Em segundo lugar, encontram-se as novas fórmulas e os métodos de aplicação de fertilizantes químicos. Dado que a capacidade de troca de cátions é perturbada num solo com

²³ Papy (1982: p.379) ilustra muito bem o que acabamos de dizer: “As possibilidades de trabalho se ampliaram. Foi possível adaptar melhor os itinerários técnicos às aptidões dos solos; assim, o aumento da rapidez do trabalho permitiu acabar mais cedo as arações de inverno na argila e aumentar as áreas trabalhadas na primavera em solos mais arenosos. As enxadas rotativas, as grades alternadas ou rotativas permitem iniciar logo o trabalho em solos argilosos úmidos; o rotocultivador e o “croskill” leve esboroam os torrões secos. Se consegue mais rapidamente afinar os horizontes superficiais graças à diminuição da distância entre os dentes dos cultivadores, as possibilidades de utilização do efeito de fracionamento provocado pela velocidade sem diminuir a profundidade do trabalho; enfim aos instrumentos animados e combinados... No entanto, estas novas possibilidades não são sem perigo. Elas podem estimular o afinamento do solo mais do que seria desejável. Mas, sobretudo, ao permitir trabalhar os horizontes superficiais desde que o trator possa passar, elas aumentam o risco de compactação provocada pela passagem de máquinas cada vez mais pesadas. Antigamente, a dupla equipamento-tração de baixa potência continha sua própria regulação em face das condições de uso. Hoje em dia não existem estes limites, e os riscos são grandes. As exigências de controle de qualidade são maiores por causa destes antagonismos mais marcados do que antes entre as possibilidades de transformar o horizonte superficial e os riscos de degradar mais profundo.”

má estrutura física, a indústria de fertilizantes tem desenvolvido e colocado à disposição dos agricultores novas fórmulas e formulações (amônio-nitratos, fosfato de amônio, polifosfatos, etc.), novas formas físicas (granulados, líquidos, gaseificados, em suspensão, etc.), bem como novas técnicas de fertilização (fracionamento das dosagens, profundidade, etc.). Inovações estas, como observa Bomastre (1968), que se tornam parte das estratégias de diferenciação de produtos entre os concorrentes dentro desta indústria.

Mais especificamente com relação ao nitrogênio, a degradação do ecossistema agrícola provoca sérios problemas. Este elemento mineral, por ser um ânion, não é retido pelo poder absorvente do solo, de modo que seu emprego excessivo provoca vários problemas, entre os quais a poluição das águas. Sebillotte (1975a) estima que o agricultor, mesmo o mais cuidadoso, coloca mais nitrogênio do que seria necessário, porque ele não tem como controlar as “sobras” de nitrogênio em fim de inverno. Se este agricultor fizesse rotações de culturas, incorporasse os restos de cultura, cultivasse com adubo verde e outras práticas ecologicamente equilibradas, não haveria problemas, pois o nitrogênio sobranete seria capturado pela microvida. Os paliativos químicos consistem em adicionar inibidores da desnitrificação ou, principalmente, empregar compostos nitrogenados protegidos (“tamponados”), de modo a que sua liberação seja lenta (fertilizantes a “retardamento”).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nosso objetivo foi de oferecer subsídios para compreender melhor a coerência tecnológica existente atualmente entre os diferentes procedimentos técnicos que definem o chamado “pacote” tecnológico da agricultura moderna. Como propõem Possas et al. (1994: p.16), esta coerência é o resultado evolucionário de diferentes trajetórias tecnológicas seguidas pelos diversos agentes inovadores na agricultura – indústrias, institutos de pesquisa, etc. –, as quais convergiram no sentido da consolidação do atual regime tecnológico. Para que esta convergência ocorresse, por sua vez, foi necessário a existência de mecanismos de coordenação entre os diversos agentes inovadores, coordenação esta que se fez em torno dos problemas concretos sentidos pelos produtores agrícolas. O que foi visto acima mostra justamente os mecanismos causadores de uma série de problemas que direcionaram e coordenaram o curso de diversas trajetórias tecnológicas. Deixa claro também a origem de uma série de problemas ambientais cujos efeitos cumulativos afetam

as condições de operação dos produtores agrícolas e que, portanto, passaram a representar importante mecanismo indutor de mudança do próprio regime tecnológico.²⁴

Estes problemas ambientais podem induzir ao desenvolvimento de novas trajetórias tecnológicas, embora não se possa, *a priori*, afirmar qual irá prevalecer. As atuais trajetórias tecnológicas evoluíram em resposta a um quadro complexo de incentivos e restrições, formando um sistema tecnoeconômico articulado que lhes confere importantes ganhos provenientes deste processo de ajuste (economias de escala, de localização, de aprendizado na produção e no uso de novas tecnologias – “learning effects”, etc). Neste sentido, cabe perguntar quais as implicações que uma eventual mudança de regime tecnológico traria para as principais fontes de inovação do setor agrícola: para a indústria de máquinas e equipamentos²⁵, de fertilizantes químicos e pesticidas, bem como para as instituições públicas de pesquisa agropecuária, além dos próprios produtores agrícolas.

Existe certamente uma inércia que favorece a permanência em caminhos conhecidos. Especialmente importante neste sentido está o conjunto de fatores sócio-econômicos e institucionais que condicionaram a opção dos agricultores pela simplificação excessiva do sistema de cultivo – a monocultura²⁶. Por outro lado, problemas específicos à dinâmica da pesquisa científica e tecnológica podem se somar aos problemas ambientais para favorecer uma mudança de trajetória, como, por exemplo, o caso da indústria de pesticidas, na qual aumentou fortemente o custo de desenvolvimento de novas moléculas de controladores químicos de pragas (ver Silveira & Salles Filho 1993). Além disso, o desenvolvimento da biotecnologia favorece tanto uma mudança radical, como uma “sobrevida” por tempo indeterminado ao atual regime tecnológico na agricultura.²⁷

Em síntese, estas considerações permitem entender melhor os determinantes microeconômicos das decisões de gerar e de adotar uma dada tecnologia “limpa”²⁸. Quanto aos determinantes da primeira, a geração de novas tecnologias, estes dependem das oportunidades tecnológicas, da estrutura da demanda do mercado e das condições de apropriabilidade. As oportunidades

²⁴ Ver a respeito, Romeiro (1984).

²⁵ A respeito da trajetórias tecnológicas nesta indústria, ver Fonseca (1990).

²⁶ Ver Romeiro (1991), para uma análise destes condicionantes.

²⁷ Para uma análise das perspectivas abertas pela biotecnologia, ver Salles (1993).

²⁸ Ver Kemp & Soete (1990).

tecnológicas com respeito ao meio ambiente, por sua vez, dependem do conhecimento científico e tecnológico acumulado, bem como dos equipamentos e capacidade disponíveis nas organizações, variando, por conseguinte, entre os diversos setores produtivos. O setor agrícola, como vimos, apresenta uma marcada especificidade a esse respeito em relação aos demais setores. Cabe notar especialmente o papel preponderante neste setor da pesquisa levada a cabo em instituições públicas, nas quais desde longa data os conhecimentos científicos e tecnológicos acumulados, bem como a infraestrutura e a capacidade de pesquisa disponíveis, permitem, em princípio, uma reconversão mais rápida das prioridades no sentido da geração de tecnologias alternativas ecologicamente equilibradas e eficientes em termos produtivos.

No que concerne ao potencial do mercado, pode-se dizer que de modo geral a demanda por técnicas de produção mais limpas depende principalmente da regulação governamental, uma vez que estes novos processos resultam, via de regra, em maiores custos, pelo menos inicialmente. E a disposição do público em geral de pagar mais por produtos mais “ecológicos” tem aumentado, mas é limitada. No caso do setor agrícola, entretanto, o fato de que a degradação ambiental não é apenas uma externalidade, mas tem tido impactos crescentes nas próprias condições de operação dos agentes produtivos que a geram, resulta em maior disposição para a adoção de tecnologias mais limpas, até certo ponto independente de medidas regulatórias governamentais.

Quanto às condições de apropriabilidade que garantem ao agente produtivo o necessário retorno do investimento realizado no desenvolvimento de uma nova tecnologia, o papel do governo no caso da geração de tecnologias limpas deve variar amplamente também, dependendo do setor produtivo. Mais uma vez o setor agrícola apresenta marcada especificidade em relação aos demais. Como foi mencionado, parte significativa do esforço de pesquisa agrícola tem sido realizado por instituições públicas de pesquisa, pelo fato de que, por suas características intrínsecas, grande parte das inovações agrícolas são passíveis de reprodução pelos usuários. Este papel tradicional do governo deve ser reforçado no caso da geração de tecnologias agrícolas limpas pois, como vimos, estas baseiam-se principalmente na gestão científica dos recursos disponíveis no próprio ecossistema agrícola. São “information intensive”, o que tenderia a limitar ainda mais o papel das organizações privadas.

No que concerne aos determinantes da adoção de tecnologia limpa, apesar de maior disposição dos agricultores em adotar tecnologias ecologicamente mais equilibradas, independentemente de políticas governamentais, a experiência tem mostrado, entretanto, que as mudanças ocorridas têm sido limitadas. As razões deste fato encontram-se precisamente na rigidez conferida a um sistema que evoluiu em resposta a um quadro complexo de restrições e incentivos, formando um sistema tecno-econômico articulado dificilmente transformável por políticas ambientais baseadas apenas em mecanismos de mercado.

Por outro lado, a pressão dos consumidores por produtos agrícolas de melhor qualidade, ecologicamente mais saudáveis, tem crescido mais lentamente do que o esperado, estando sujeita a recuos e avanços. Em parte isto se deve à falta de informação sistemática e confiável que se contraponha à idéia corrente (reforçada pela ação dos interesses estabelecidos) de que não há alternativa economicamente viável e de que, afinal, os impactos no ecossistema agrícola, bem como os riscos à saúde não seriam tão importantes. Esta postura do consumidor não é apenas causa, mas também consequência do tipo de resposta dada, até o presente momento, pelos agentes produtivos ao problema ambiental: produtos relativamente mais caros, mal apresentados e distribuídos. Este fato revela que sem uma estratégia global de mudança tecnológica, as respostas de mercado às demandas por “bens ambientais” são, na maioria das vezes, inadequadas. As vantagens imediatas do sistema produtivo atual tendem a prevalecer.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOIFFIN, J.; MOUNNIER, G. États, propriétés, et comportements des sols: recherche et utilisation des critères de fertilité physique. **Bulletin Technique d'Information**, n.370/372, Mai/Juin/Juillet/Août, 1982.
- BONASTRE, J.B. Creation et propagation de l'innovation: éléments de stratégie commerciale dans l'industrie d'engrais. **Bulletin Technique d'Information**, n. 231, Juillet/Août, 1968.
- BROUSSE, H. **Technologie agricole**. Paris: INSEE, 1947.
- CHAMBON, J.P. Les prédateurs animaux et leur évolution sous l'action des systèmes de cultures. **Bulletin Technique d'Information**, n.370/372, Mai/Juin/Juillet/Aout, 1982.
- DUTHIL, J. Connaissance du milieu. In: ELEMENTS d'Ecologie et d'Agronomie. Paris: J.B. Baillière et Fils, 1971.

- _____. Exploitation et amelioration du milieu: bases d'une nutrition efficace du vegetal. In: ELEMENTS d'Ecologie et d'Agronomie. Paris: J.B. Bailliere et Fils, 1973.
- _____. Exploitation et amelioration du milieu: emploi des facteurs de la production vegetale. In: ELEMENTS d'Ecologie et d'Agronomie. Paris: J.B. Bailliere et Fils, 1973b.
- FLEURY, A.; MASLE, J.; SEBILLOTTE, M. L'analyse de l'elaboration du rendement outil de jugement du milieu. **Bulletin Technique d'Information**, n. 370/372, Mai/Juin/Juillet/Aout, 1982.
- FONSECA, M.D. **Concorrência e progresso técnico na indústria de máquinas para a agricultura**: um estudo sobre trajetórias tecnológicas. Campinas: UNICAMP-IG, 1990. Tese de Doutorado
- GABEL, M. **Hoping**: food for everyone. New York: Anchor Books, 1979.
- GOLDSMITH, E. Pesticides create pests. **The Ecologist**, v.10, n.3, March, 1980.
- GUERIF, J. La matiere organique du sol et son evolution. **Bulletin Technique d'Information**, n. 370/372, Mai/Juin/Juillet/Août, 1982.
- HAYAMI, Y.; RUTTAN, V.W. **Agriculture development**: an international perspective. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1971.
- HENIN, S.; GRAS, R.; MONNIER, G. Le profil cultural. In: L'ETAT Physique du Sol et ses Consequences Agronomiques. Paris: Masson et Cie., 1969.
- KEMP, R.; SOETE, L. Inside the green box: on the economics of technological change and environment. In: KEMP, R.; SOETE, L. (eds.). **New explorations in the economics of technical change**. London: Pinter Publishers, 1990.
- KLEINE, S.J.; ROSENBERG, N. An overview of innovation. In: LANDAU, R.; ROSENBERG, N. **The positive sum strategy**. Washington, D.C.: National Academy Press, 1986.
- KOVDA, V.A. Soil loss: an overview. **Agro-ecosystems**, v.3, n.3, June, 1977.
- KRUMMEL, J.; HOUGH, J. The economic consequences of abandoning pesticide use. **The Ecologist**, v.10, n.3, March, 1980.
- LAPPE, F.M.; COLLINS, J. **World hunger**: ten myths. Institute for Food and Development Policy, 1979.
- LECOMTE, A.; RIEDEL, C.E. **L'agriculture productive**. Hachette, Paris: Encyclopedie des Connaissances Agricoles, 1958.
- MITCHELL, F.S. Conditions for mechanization in Europe. In: MECHANIZATION in Agriculture. Amsterdam, North Holland, 1960.
- MONNIER, G.; STENGEL, P. La composition granulometrique des sols: un moyen de prevenir leur fertilite physique. **Bulletin Technique d'Information**, n. 370-372, Mai/Juin/Juillet/Août, 1982.

A.R. Romeiro

- PAPY, F. Praticabilite du milieu et itineraires techniques. **Bulletin Technique d'Information**, n. 370-372, Mai/Juin/Juillet/Août, 1982.
- PASCHOAL, A. O ônus do modelo da agricultura industrial. **Revista Brasileira de Tecnologia**, Brasília, v.14, jan-fev., 1983a.
- _____. Biocidas: morte a curto e a longo prazo. **Revista Brasileira de Tecnologia**, Brasília, v.14, jan-fev., 1983b.
- PEDRO, G. Pedologie et richesse chimique du milieu. **Bulletin Technique d'Information**, n. 370-372, Mai/Juin/Juillet/Août, 1982.
- PIMENTEL, D. et al. Land degradation: effects on food and energy resources. **Science**, v.194, October, 1976.
- PIMENTEL, D.; M. **Food, energy and society**. London: Edward Arnold Publishers, 1979.
- POSSAS, M.; SALLES, S.; SILVEIRA, J.M. **An evolutionary approach to technological innovation in agriculture**: some preliminary remarks. Campinas: UNICAMP, 1994.
- REBOUL, C. Determinants sociaux de la fertilité des sols. **Actes de la Recherche en Sciences Sociales**, Paris, n. 17/18, novembre, 1977.
- _____. **Determinants économiques de la mécanisation de l'agriculture**: l'accroissement du parc des tracteurs de grande puissance. Paris: INRA, 1978. (Série d'Economie et Sociologie Rurales).
- ROMEIRO, A.R. Ciência e tecnologia na agricultura: algumas lições da história. **Cadernos de Difusão de Tecnologia**, Brasília, v.4, n.1, p.59-95, jan/abr., 1987.
- _____. O modelo de inovações induzidas de Hayami e Ruttan. **Pesquisa e Planejamento Economico**, v.18, n.2, agosto, 1988.
- _____. Dinâmica de introdução de inovações na agricultura: uma crítica à abordagem neoclássica. **Revista de Economia Política**, v.11, n.11, jan-mar., 1991.
- _____. O modelo euro-americano de modernização agrícola. **Revista Nova Economia**, Belo Horizonte, v.2, n.12, novembro, 1991a.
- _____. Organização da produção, tecnologia e condições de trabalho na agricultura. **Revista Brasileira de Economia**, n.13, v.46, jul./set., 1992.
- _____. **Agricultura e meio ambiente**: teorias e história do progresso técnico. 1992a. (Mimeo).
- _____. Agricultura e agroindústria: perspectivas de novas configurações. **Revista de Economia Política**, v.14, n.3, julho-setembro, 1994.
- ROSENBERG, N. **Perspectives on technology**. London: Cambridge University Press, 1976.
- _____. **Inside the black box**. London: Cambridge University Press, 1982.
- _____. **Exploring the black box**. London: Cambridge University Press, 1994.

Mecanismos indutores de progresso técnico na agricultura:...

- REMY, J.C.; MARIN-LAFLECHE, A. L'Entretien organique des terres: cout d'une politique de l'humus. **Entreprises Agricoles**, n.184, novembre, 1976.
- RUSSELL, E.J. **Soil conditions and plant growth**. London: Longmans, 1912.
- SALLES, S.; SILVEIRA, J.M. As fontes de inovações na agricultura e suas transformações recentes. XXI Encontro da ANPEC, Belo Horizonte, **Anais...**, 1992-1993.
- SALLES, S. **A dinâmica tecnológica da agricultura**: perspectivas da biotecnologia. Campinas: UNICAMP-IE, 1993a. Tese de Doutorado.
- SEBILLOTTE, M. La monoculture de cereales: bles/bles? - mais/mais? **Entreprises Agricoles**, n.167, juin, 1975a.
- _____. Faut-il enfouir la paille? Pailles et Engrais Verts: sources de matiere organique. **Entreprises Agricoles**, n.171, octobre, 1975b.
- _____. Conception generale du numero. **Bulletin Technique d'Information**, n. 370-372, Mai/Juin/Juillet/Août, 1982a.
- _____. Pratiques des agriculteurs et evolution de la fertilité du milieu: elements pour un jugement des systemes de culture. **Bulletin Technique d'Information**, n. 370-372, Mai/Juin/Juillet/Août, 1982b.
- SHIKI, S. Mecanização agrícola: homem e terra sob impacto. **Revista Brasileira de Tecnologia**, Brasília, v.15, n.2, mar-abr., 1984.
- TRYPIN, F. Quelques techniques de preparation du sol sous les climats de l'Ouest et du Sud-Ouest de la France. In: LES HOMMES et leurs Sols. N. special du Journal d'Agriculture Tropicale et Botanique Appliquée, v. XXIV, n.2/3, avr-septembre, 1977.
- ZOLLA, D. **L'Agriculture moderne**. Paris: Flammarion, 1913.