

O ENSINO DE MECÂNICA QUÂNTICA SOB UMA PERSPECTIVA DOS REFERENCIAIS TEÓRICOS DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA E DOS CAMPOS CONCEITUAIS

Carlos Raphael Rocha ^a [carlos.rafael@ufrgs.br]
Victoria Elnecave Herscovitz ^b [victoria@if.ufrgs.br]
Marco Antonio Moreira ^b [moreira@if.ufrgs.br]

^a Universidade do Estado de Santa Catarina, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

^b Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO

A Mecânica Quântica se constitui em uma das maiores revoluções científicas do século XX e vem apresentando, ainda agora, grandes e importantes conseqüências, tanto de conteúdo como tecnológicas. Por estes motivos, a mesma deve merecer a devida atenção tanto em cursos de nível médio como universitário. Além de ser um veículo para a atualização curricular, esta teoria, por em geral ser considerada uma novidade para os alunos, pode estimulá-los para o aprendizado da Física. Faz-se também necessário que professores em formação compreendam esta teoria e que cursos de graduação sejam elaborados visando esta proposta. Sugere-se, então, que uma análise para o ensino introdutório de Mecânica Quântica (MQ) seja feita segundo a perspectiva de duas teorias de aprendizagem: a Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel e a Teoria dos Campos Conceituais de Gerard Vergnaud. Assim, este trabalho inicialmente se utiliza das definições dos principais conceitos da Teoria da Aprendizagem Significativa, a saber, o de aprendizagem significativa, o de aprendizagem mecânica, o de subsunçores e o de organizadores prévios, para analisar suas contribuições para o ensino de MQ. Em seguida, apresentam-se as definições e estudam-se as implicações para o ensino de MQ dos principais conceitos da Teoria dos Campos Conceituais, a saber, o de esquema, o de conceito, o de invariantes operatórios, o de situação e o de campo conceitual. No decorrer do trabalho, os principais conceitos de cada teoria são apresentados utilizando exemplos da MQ que visam mostrar a efetividade da utilização das duas teorias como referencial para o ensino de MQ, seja em nível introdutório ou aprofundado. Ao final, faz-se uma composição das mesmas enaltecendo suas contribuições e a importância de o professor conhecer e trabalhar com estas duas teorias.

1. INTRODUÇÃO

Como uma das maiores revoluções científicas do século XX, a Mecânica Quântica (MQ) e seu ensino vêm sendo alvo de muitos estudos nos últimos anos. A intenção da presente contribuição é mostrar que esta teoria pode ser melhor compreendida se estudada e ensinada sob o enfoque de duas teorias de aprendizagem: a Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel e a Teoria dos Campos Conceituais de Gérard Vergnaud. Assim, mostram-se algumas importantes

contribuições destas teorias utilizando exemplos de conceitos e princípios da MQ, trabalhados em minicursos e cursos de breve duração pelos autores.

2. A TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE DAVID AUSUBEL

A Teoria da Aprendizagem Significativa de David Paul Ausubel (1968, 2000) se ocupa do processo de apropriação de um corpo organizado de conhecimento pelo aluno em situação formal de ensino. Pretende-se, aqui, analisar a importância desta teoria na aquisição dos primeiros princípios da MQ pelos alunos.

2.1. Aprendizagem Significativa

A aprendizagem significativa é um processo no qual uma nova informação relaciona-se de forma não-arbitrária e substantiva com algum aspecto especificamente relevante da estrutura de conhecimento do indivíduo, ou seja, há uma **interação do novo conhecimento com o já existente** (MOREIRA, 1999a, p. 153). Em geral, alunos adentram as salas de aula de disciplinas introdutórias de MQ com conhecimentos relacionados à Física Clássica. Assim, em um primeiro momento, poder-se-ia crer que a melhor abordagem seria trabalhar inicialmente com aspectos clássicos vinculados à MQ para depois conduzir aos conceitos quânticos. Na verdade, esta é a opção utilizada em grande número, senão na maioria dos cursos de graduação de Licenciatura em Física no país e, por mais que existam pessoas capazes de justificá-la, é sabidamente infrutífera para a maior parte dos alunos. **Defende-se aqui que a interpretação de fenômenos quânticos deve evitar a utilização de conceitos ou analogias fortemente ligados à Física Clássica.**

O processo da aprendizagem significativa é uma aquisição (e negociação) de significados. Para que ocorra esta aquisição/negociação, devem ser levadas em conta duas importantes condições iniciais (AUSUBEL, 2000, p. 1):

- 1) o material apresentado ao aprendiz deve ser relacionável com uma parte adequada da estrutura cognitiva do aprendiz de forma não-arbitrária e não-literal;
- 2) **a estrutura cognitiva do aprendiz deve conter idéias relevantes com as quais o novo material deve se relacionar.** (Essas idéias, chamadas **subsunçores**, serão comentadas mais adiante.)

Um material que apresente as condições descritas na primeira condição é dito *potencialmente significativo*. Porém, tal material não pode garantir sozinho que haja a aprendizagem significativa. Por isto, há a necessidade da segunda condição.

Existe ainda outra condição para a ocorrência da aprendizagem significativa: o aprendiz deve apresentar uma pré-disposição para aprender. Porém, não se deve confundir pré-disposição com motivação. Podem existir situações em que o aprendiz não esteja motivado para aprender, mas predisposto. Isto acontece, por exemplo, quando o aluno necessita aprender determinado conteúdo para conseguir aprovação em algum exame ou, ainda, quando não tem apreço pela disciplina. Nestes casos, o aluno pode aprender significativamente o novo conhecimento ou apenas decorá-lo. Portanto, para o adequado ensino de MQ deve-se analisar uma série de condições para promover a aprendizagem significativa. O material adotado (ou elaborado) deve trabalhar com aspectos relevantes da estrutura cognitiva do aprendiz de forma não-literal e não-arbitrária.

2.2. Aprendizagem Mecânica

Em contraponto à aprendizagem significativa, Ausubel propõe a *aprendizagem mecânica*. Neste tipo de aprendizagem as novas informações são apreendidas praticamente sem interagir com conceitos relevantes existentes na estrutura cognitiva, isto é, de maneira literal e arbitrária. Assim, o aprendiz não dá significados ao que aprende.

A memorização de fórmulas, leis e conceitos é um exemplo típico de aprendizagem mecânica (MOREIRA, 1999b, p. 14). Alguns estudos em vésperas de prova e que servem somente para a prova também se caracterizam como aprendizagem mecânica. O esquecimento de tais tópicos ocorre rapidamente após sua “utilização” (ibid.). Observa-se, por exemplo, que alguns alunos buscam memorizar a equação fundamental da MQ sem atribuir a ela praticamente qualquer significado, pelo fato de referir-se a sistemas quânticos. Isto sinaliza para a ausência de conceitualização significativa, tanto de estado de objeto quântico como de evolução temporal dos mesmos.

A relação entre aprendizagem significativa e aprendizagem mecânica não é dicotômica. No caso da MQ, a formação de conceitos adequados pode ser feita, inicialmente, com auxílio da aprendizagem mecânica. Naturalmente, isso deve ser feito com cuidado, propondo ao aluno situações progressivamente mais complexas, que, também progressivamente levem à conceitualização significativa. Como exemplos de conceitos que podem ser criados através da aprendizagem mecânica têm-se a superposição, a probabilidade, entre outros citados no decorrer deste trabalho.

2.3. Subsúnciores

Segundo Ausubel (1968, p. VI), se fosse possível isolar uma única variável no processo de aprendizagem, o conhecimento prévio seria o fator mais importante para a ocorrência da aprendizagem significativa. A partir desta idéia, pode-se avaliar que o aprendizado do aluno é determinado por aquilo que ele já sabe, ou seja, por sua estrutura cognitiva.

A um conhecimento já existente na estrutura cognitiva do aprendiz, em condições de ser usado para atribuir significados a novos conhecimentos, em um processo interativo, Ausubel denomina *conceito subsunçor*, ou simplesmente *subsunçor*. Sem a existência de subsúnciores adequados, não há condições de ocorrer a aprendizagem significativa. Um aluno que tenha aprendido significativamente uma nova informação deve ter condições de atribuir significados a esta nova informação.

Segundo esta visão, conceitos como o de trajetória e o de compatibilidade (irrestrita) de observáveis físicos, oriundos da Física Clássica, não podem ser chamados de subsúnciores porque não deve ser com eles que os novos “conceitos quânticos” devem se relacionar.

Porém alguns conceitos da Física Clássica podem ser úteis e funcionar como subsúnciores para o aprendizado de MQ. Por exemplo, a superposição de ondas é um fenômeno bastante estudado em disciplinas de Física Geral em cursos de graduação. Ora, uma adequada superposição de ondas planas pode gerar uma função semelhante a delta de Dirac, ou seja, uma onda razoavelmente localizada, o que se considera como um importante subsunçor em cursos introdutórios para o estudo da MQ. Efetivamente, tal superposição de ondas planas pode auxiliar os alunos a perceber que, na MQ, auto-estados de momento linear se combinam dando origem a auto-estados de posição e vice-

versa. Com isso, vê-se que a superposição de ondas (junto com a de vetores no plano) se constitui num importante subsunçor para o aprendizado do conceito de superposição linear de estados e para o entendimento de que auto-estados de posição não são auto-estados de momento linear e vice versa. Esta conceitualização, se significativa, conduz à compreensão do que denominamos de observáveis não compatíveis em MQ.

2.4. Organizadores Prévios

Como seria possível trabalhar com algum material potencialmente significativo em MQ e que tenha relação com idéias relevantes existentes na estrutura cognitiva do aprendiz, se as idéias existentes foram, em geral, criadas a partir da Física Clássica? Faz-se necessário, neste caso, promover a construção de subsunçores adequados que consigam propiciar a aprendizagem significativa. Mas de onde vêm os subsunçores? Segundo Moreira (1999, p. 154-155), são várias as respostas para esta pergunta, porém nenhuma definitiva.

Contudo, nas situações em que não existem subsunçores adequados para a compreensão da nova informação, Ausubel sugere a utilização de *organizadores prévios* em substituição a tais subsunçores e somente depois apresentar a nova informação ao aluno. Um organizador prévio é um recurso pedagógico que ajuda a suprir a deficiência de subsunçores necessários para que ocorra aprendizagem significativa (AUSUBEL, 2000, p. 11), isto é, ele deve servir de ponte entre aquilo que o aluno já sabe e aquilo que deveria saber para que pudesse aprender de forma significativa. Afinal, como a aprendizagem significativa decorre da interação do novo conhecimento com os aspectos relevantes da estrutura cognitiva, se não existem tais aspectos relevantes (subsunçores), não há como ocorrer aprendizagem significativa.

Os organizadores prévios devem ser apresentados em um nível de abstração, generalidade e inclusividade mais alto que o novo material a ser aprendido (ibid.). Resumos costumam apresentar o mesmo nível de abstração, generalidade e inclusividade que o próprio material, salientando alguns pontos em troca da omissão de informações menos importantes. Logo, apesar de ser um material introdutório, o organizador prévio não deve ser visto como um resumo.

Em MQ, um organizador prévio deve conter referências a conceitos que serão utilizados mais tarde no decorrer de seu estudo. Como exemplos, pode-se abordar os conceitos de *superposição linear de estados, estado quântico e evolução temporal* de forma simples, referindo-se a conceitos clássicos, porém sem interpretar os fenômenos posteriormente apresentados com tais conceitos. A interpretação da MQ deve ser feita com os conceitos desta própria teoria. Assim, por exemplo, valendo-se dos exemplos clássicos de superposição linear, visa-se promover a generalização para espaços lineares (complexos).

3. A TEORIA DOS CAMPOS CONCEITUAIS DE GÉRARD VERGNAUD

A Teoria dos Campos Conceituais de Gérard Vergnaud se ocupa do processo de desenvolvimento cognitivo. Isso porque, segundo Vergnaud (1996, p. 112), para se entender o conhecimento, é útil e necessário estudar seu desenvolvimento no sujeito.

A teoria de Vergnaud é uma teoria psicológica de conceitos, ou, ainda, uma teoria cognitivista do processo de conceitualização do real. Assim, ela é uma teoria psicológica cognitivista e que supõe a *conceitualização* como o núcleo do desenvolvimento cognitivo (op. cit., p. 118).

No que concerne aos objetivos deste trabalho, a MQ é considerada como uma teoria que engloba, como campo conceitual, outras "subteorias" que, por sua vez apresentam inúmeros conceitos e teoremas.

3.1. Esquema

Vergnaud considera que, para analisar a cognição, é fundamental trabalhar com o conceito de *esquema* (op. cit., p. 113). A análise do processo de desenvolvimento cognitivo deve ser feita em cima da interação esquema-situação e, assim, analisar o "sujeito-em-situação".

Esquema é a organização invariante do comportamento para uma determinada classe de situações (VERGNAUD, 1993, p. 2). É bom enfatizar que não é o comportamento que é invariante, mas sua organização (GRECA e MOREIRA, 2002, p. 37). É nos esquemas que se deve pesquisar os conhecimentos-em-ação do sujeito, ou seja, os elementos cognitivos que fazem com que a ação do sujeito seja operatória (VERGNAUD, 1993, p. 2).

A importância dos esquemas fica mais evidente ao lembrar que os alunos constantemente estão sendo expostos a novas situações e que eles devem conseguir lidar com elas. Para isso, os estudantes recorrem a seus esquemas já construídos, combinando-os de forma que consigam lidar com as situações e, conseqüentemente, conduzir à adaptação. Este processo pode não ser realizado em uma primeira tentativa e, assim, os alunos devem continuar buscando a construção dos novos esquemas, com ou sem o auxílio do professor ou de outros estudantes (VERGNAUD, 1998, p. 173).

Consideradas, em geral, como novidades para a maioria dos alunos, situações utilizadas no estudo da MQ exigem a construção de diversos esquemas novos que os alunos podem criar utilizando conceitos da Física Clássica devidamente arraigados em sua estrutura cognitiva. É papel do professor fazer com que isso não ocorra e não se constitua em um entrave para o aprendizado subsequente da MQ. É o caso, por exemplo, do conceito de trajetória (única), do qual muitos alunos, e até graduados, não conseguem se liberar em MQ.

3.2. Conceitos

Ao colocar a conceitualização no centro do processo de desenvolvimento cognitivo, Vergnaud afirma que um indivíduo se desenvolve cognitivamente na medida em que atribui significado aos conceitos. Percebe-se, então, a importância do conceito de *conceito* nesta teoria.

Um conceito não pode ser reduzido à sua definição, principalmente se o interesse é no ensino do mesmo e em sua aprendizagem (VERGNAUD, 1993, p. 1). Um conceito deve ser analisado levando em conta sua constituição (VERGNAUD, 1998, p. 177). Segundo Vergnaud (1990, p. 145), um conceito pode ser definido como um tripé de conjuntos, $C = (S, I, R)$, em que:

S representa o conjunto de situações que dão sentido ao conceito (o *referente*);

I representa o conjunto de invariantes operatórios associados ao conceito (o *significado*);

R representa o conjunto de representações simbólicas que podem ser usadas para indicar e representar estes invariantes e, conseqüentemente, representar as situações e os procedimentos para lidar com elas (o *significante*).

É através de situações e de problemas a resolver que um conceito adquire significado (VERGNAUD, 1990, p. 135), ou seja, são as situações que possibilitam dar sentido aos conceitos (MOREIRA, 2002, p. 11). Situação é entendida como uma tarefa ou uma combinação delas. Ao tratar o processo de conceitualização como a pedra angular da cognição, Vergnaud considera que o par esquema-situação é o responsável pela análise de tal processo. Além disto, este par possui uma relação dialética. Um conceito se torna significativo através de uma variedade de situações, mas o sentido não está na situação em si (VERGNAUD, 1993, p. 18). O sentido é uma relação entre a situação e os esquemas. O ensino de MQ deve utilizar um grande número de situações nas quais os principais conceitos são aplicados para que os alunos possam compreendê-los. Os experimentos de dupla fenda e de Stern-Gerlach são situações a serem utilizadas para auxiliar o aluno a compreender conceitos inerentes a estados de objetos quânticos, como o de incompatibilidade de alguns observáveis.

Invariantes operatórios são conhecimentos contidos nos esquemas. Os teoremas-em-ação e os conceitos-em-ação são invariantes operatórios e, por isso, são componentes essenciais dos esquemas (VERGNAUD, 1998, p. 167). Um *teorema-em-ação* é uma proposição tida como verdadeira sobre o real e *conceito-em-ação* é uma categoria de pensamento tida como pertinente, relevante (op. cit., p. 168). Entre os conceitos-em-ação e os teoremas-em-ação há uma relação dialética, pois os conceitos são ingredientes dos teoremas e os teoremas são propriedades que dão aos conceitos seus conteúdos (VERGNAUD, 2007, p. 294).

Não é preciso enfatizar que a MQ possui conceitos e princípios rigorosamente definidos e que são extremamente importantes. No entanto, alguns conceitos clássicos podem ser perigosos se aparecerem no decorrer do ensino de MQ. O conceito de orbital, por exemplo, pode ser materializado pelos alunos para o conceito de órbita de modo a simplificar o conteúdo, apesar de tais conceitos não serem análogos. Assim, conceitos quânticos precisam ser devidamente trabalhados de forma a não propiciar o aparecimento de tais aproximações simplistas.

3.3. Campos Conceituais

Um *campo conceitual* pode ser definido como um grande conjunto, informal e heterogêneo, de situações e problemas cuja análise e tratamento requer diversas classes de conceitos, procedimentos e representações simbólicas que se conectam umas com outras (GRECA e MOREIRA, 2002, p. 35). Neste aspecto, assim como em outras teorias físicas, a MQ se constitui num imenso campo conceitual repleto de conceitos, leis e representações fortemente interligados.

Segundo Vergnaud (ibid.), o conhecimento está organizado em campos conceituais que o aprendiz domina ao longo de um expressivo período de tempo, através da maturidade, experiência e aprendizagem. Não será em apenas algumas aulas que um aluno conseguirá captar o conhecimento presente em determinado conteúdo. Dependendo do tema, o aluno pode levar anos para dominar um campo conceitual.

Simplificadamente, o campo conceitual é visto como um conjunto de muitas situações que requerem, por sua vez, o domínio de vários conceitos, procedimentos e representações de naturezas distintas (MOREIRA, 2002, p. 15). Portanto, o ensino dos campos conceituais não pode ser visto como o ensino de um sistema de conceitos nem como conceitos isolados.

Considerar a MQ não relativística como um campo conceitual é dar a ela sua devida importância. A estruturação desta teoria possui um modo organizado e várias ramificações, que podem de fato transcender a teoria-base. É o caso, por exemplo, da

chamada segunda quantização, em que é abandonada a restrição não relativística e a conseqüente imposição da conservação do número de partículas envolvidas nos processos. Por exemplo, a Eletrodinâmica Quântica que descreve interações entre partículas carregadas, mediadas por fótons e a Cromodinâmica Quântica em que são estudadas as interações fortes são teorias desenvolvidas após a compreensão da estrutura da MQ.

3.4. O papel do professor

O professor é um importante mediador no longo processo de domínio de um campo conceitual pelo aluno (MOREIRA, 2002, p. 17). As concepções prévias dos alunos contêm teoremas e conceitos -em-ação que podem não ser teoremas e conceitos científicos, mas podem evoluir para eles. O papel do professor é o de tornar explícito o conhecimento implícito do aluno para que este possa ser modificado para o conhecimento compartilhado pela comunidade científica. Essa transformação do conhecimento implícito em explícito deve ser feita sem nunca subestimar ou desvalorizar aquilo que o aluno já sabe (op. cit., p. 21). Nota-se que, segundo a teoria de Vergnaud, para que se possa aprender é necessário que haja mediação, quer com o professor como com outros alunos (VERGNAUD, 1996, p. 118).

Neste contexto, é importante que o professor busque exemplos adequados (situações) que consigam servir de âncora para o aprendizado dos conceitos. Como já mencionado, inúmeros fenômenos quânticos podem ser analisados de forma simplificada para que o aluno consiga promover a conceitualização. O experimento de dupla fenda, o experimento de Stern-Gerlach e o emaranhamento quântico são algumas sugestões de exemplos a serem utilizados pelo professor. Outros processos podem e devem ser analisados.

4. A APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DO CAMPO CONCEITUAL DA MECÂNICA QUÂNTICA

Além das implicações educacionais anteriormente mencionadas, a teoria de Ausubel possui outras relacionadas ao ensino de MQ. A forma de pensar segundo a Física Clássica não conduz a subsunções a serem utilizados no aprendizado da MQ, devido a serem as duas teorias incomensuráveis, apesar de a Física Clássica poder ser considerada como uma situação limite da Física Quântica em seus aspectos mais elementares. Logo, a utilização de vários conceitos relacionados à Física Clássica deve ser evitada, crendo-se que tal utilização pode, na verdade, acarretar a construção de obstáculos representacionais pelos estudantes (MOREIRA e GRECA, 2004, p. 27).

Então, deve-se evitar fazer uso da estrutura de pensamento sugerida pela Mecânica Clássica, para que os conceitos da Mecânica Quântica possam ser interpretados com um “pensamento quântico”. Desta forma, o ideal é que, inicialmente, os estudantes construam, por um processo de formação de conceitos, alguns subsunções adequados para o prosseguimento no estudo em Mecânica Quântica.

Em particular, para evitar os obstáculos epistemológicos aos conceitos da MQ, deve-se buscar situações para as quais os alunos não tenham conceitos clássicos em que se apoiar (e nem devam), ou seja, situações em que não usem conhecimentos prévios inadequados que possam dificultar a aprendizagem significativa ao invés de facilitá-la (MOREIRA, 2002, p. 19). A Mecânica Quântica e a Mecânica Clássica apresentam continuidades, mas, por serem campos conceituais distintos, para entender uma é

preciso estabelecer determinadas rupturas com a outra. Greca e Herscovitz (2002, 2005) também recomendam que a abordagem quântica aos princípios fundamentais seja feita desde o primeiro contato com a Mecânica Quântica, buscando assim um desprendimento da Mecânica Clássica.

Quando Vergnaud afirma que o desenvolvimento cognitivo ocorre a partir do momento em que o sujeito trabalha com a *conceitualização* do mundo em que vive, tem-se que se deve propor o máximo de situações em que o aluno consiga construir os conceitos. São essas situações, enfim, que conseguirão promover a mencionada conceitualização. As situações, em MQ, devem buscar a construção de novos conceitos e não se apoiar em conceitos clássicos. Um exemplo de situação a ser utilizada no início de cursos introdutórios é a de emaranhamento quântico, enquanto adiante se aborda a criptografia quântica, fundamental para a atual área de Comunicações e para a computação quântica.

Outro grande desafio existente nos campos conceituais da Ciência, em particular nos da Física, diz respeito à atribuição dos mesmos significados para determinados conceitos em contextos diferentes. Conceitos como calor e força são comuns no cotidiano, possuem significados diferentes em relação aos conceitos científicos e acabam por ser utilizados pelos alunos nas salas de aula sem nenhuma transformação ou adaptação. Devido à recente divulgação de tópicos de MQ em filmes, livros e palestras, corre-se o risco de acontecer algo semelhante com tal teoria. Conceitos de MQ, extremamente rigorosos em sua definição (e. g., superposição linear de estados, dualidade relativa a observáveis não compatíveis, orbitais), podem ser “transformados” em algo mais simples, podendo tornar-se obstáculos pedagógicos para o ensino de MQ. Assim, quanto antes os estudantes de ensino médio ou superior tiverem contato com a MQ, melhor será para o ensino de Física como um todo.

5. REFERÊNCIAS

AUSUBEL, D. P. *Acquisition and retention of knowledge: a cognitive view*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000, 212 p.

AUSUBEL, D. P. *Educational psychology: a cognitive view*. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1968, 685 p.

GRECA, I. M.; HERSCOVITZ, V. E. Superposição linear em ensino de mecânica quântica. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, Belo Horizonte, v. 5, n. 1, p. 61-77, jan. 2005.

GRECA, I. M., MOREIRA, M. A. Além da detecção de modelos mentais dos estudantes. Uma proposta representacional integradora. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 31-53, 2002.

GRECA, I. M.; HERSCOVITZ, V. E. Construyendo significados en Mecánica Cuántica: fundamentación y resultados de una propuesta innovadora para su introducción en el nivel universitario. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 20, n. 2, p. 327-338, 2002.

MOREIRA, M. A. *Teorias de aprendizagem*. São Paulo: EPU, 1999a, 195 p.

MOREIRA, M. A. *Aprendizagem significativa*. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1999b, 130 p.

MOREIRA, M. A. A teoria dos campos conceituais de Vergnaud, o ensino de ciências e a pesquisa nesta área. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 7-29, mar. 2002.

MOREIRA, M. A.; GRECA, I. M. *Obstáculos representacionales mentales en el aprendizaje de conceptos cuánticos*. En Sobre cambio conceptual, obstáculos representacionales, modelos mentales, esquemas de asimilación y campos conceptuales. Porto Alegre: Instituto de Física, p. 26-40, 2004.

VERGNAUD, G. ¿En qué sentido la teoría de los campos conceptuales puede ayudarnos para facilitar aprendizaje significativo? *Investigação em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 285-302, ago. 2007.

VERGNAUD, G. A comprehensive theory of representation for mathematics education. *Journal of Mathematical Behavior*, Dordrecht, v. 17, n. 2, p. 167-181, June 1998.

VERGNAUD, G. Education: the best part of Piaget's heritage. *Swiss Journal of Psychology*. v. 55, n. 2/3, p. 112-118, 1996.

VERGNAUD, G. Teoria dos campos conceituais. *Anais do 1º Seminário Internacional de Educação Matemática*, Rio de Janeiro, p. 1-26, 1993.

VERGNAUD, G. La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, Paris, v. 10, n. 2-3, p. 133-170, 1991.