

EVALUACIÓN Y DESARROLLO DE LA METACOGNICIÓN EN LA ENSEÑANZA DE LA QUÍMICA

Santiago Sandi-Urena¹, Melanie M. Cooper²

(1) Departamento de Química, Universidad de Florida del Sur, Tampa, FL 33620

(2) Departamento de Química, Universidad de Clemson, Clemson, SC 29634

Abstract.

Metacognition may be defined as the knowledge and regulation of one's own cognitive system, the capacity to reflect about one's actions and thoughts. Current views on metacognition pose it as a fundamental factor in achieving autonomy in learning, and promoting deep understanding and problem-solving skills. This relevance has in turn led to interest in creating learning experiences conducive to developing the use of metacognition, especially in science education. Despite this increasing interest, progress has been hindered by the inherent difficulties associated with developing assessment methods for metacognition. Consequently, evidence for the efficacy and effectiveness of learning environments in promoting metacognition has been scarce. In this article we present some of the work that our research group has done to contribute in addressing this problem. We report the development and validation of an automated and rapid multi-methods strategy to assess regulatory metacognition in chemistry problem solving from large numbers of participants. This strategy combines two separate instruments: one prospective, the Metacognitive Activities Inventory (MCAi) and one concurrent, the Interactive MultiMedia Exercises (IMMEX). Additionally, we describe two interventions that by using the multi-methods assessment strategy have been demonstrated to enhance metacognition use and problem solving ability. The first intervention is a cooperative problem-based general chemistry laboratory; this study presents evidence that links participation in the laboratory with development of higher order skills. The second instantiation is a two-week collaborative problem solving activity. Findings from a phenomenological approach nested within a mixed-methods design suggest that meaningful, purposeful social interaction and reflective prompting act as promoters of metacognition development in both learning environments. These factors are not exclusive to the interventions and we maintain that they are transferable and may be embedded by practitioners in their instruction. This report presents the development and validation of metacognition assessment methods and studies of the efficacy of learning experiences in developing metacognition.

Keywords: Chemistry education, Metacognition, Assessment, Learning environment

Palabras clave: Educación Química, Metacognición, Evaluación, Ambientes de Aprendizaje

I. INTRODUCCIÓN

La relevancia de la metacognición en el aprendizaje y la solución de problemas han sido demostradas de manera extensa [1-4] y la evidencia sugiere que puede ser aún más importante para la competencia en solución de problemas que las aptitudes generales [5]. El término metacognición fue originalmente acuñado en los años 70 por Flavell quien lo

** ssandi@usf.edu

definió como conocimiento y cognición sobre fenómenos cognitivos [6]. A pesar de la extensa investigación sobre este constructo y su influencia en nuestra comprensión del aprendizaje, esta definición ha generado múltiples interpretaciones y aún no se cuenta con una conceptualización unificada [7] ni con consenso sobre la relación de la metacognición con otros conceptos primordiales en las ciencias del aprendizaje tal como la autorregulación. Dentro de esta diversidad de funcionalizaciones, quizá la más prevalente sea la que la propone como el “conocimiento y regulación del propio sistema cognitivo” [8]. En términos generales, la metacognición difiere de la cognición en que es necesaria para *entender una tarea* que se ejecuta mientras que la cognición puede ser necesaria para simplemente *ejecutar la tarea* [9]. Para nuestros propósitos de investigación nos suscribimos al marco teórico que describe dos componentes principales de la metacognición: conocimiento sobre la cognición (declarativo, procedimental y condicional) y regulación de la cognición [4, 9-10]. Este último es el componente ejecutivo que incluye el repertorio de acciones implementadas para completar una tarea (que bien puede ser el aprendizaje o la solución de un problema) e incluye aspectos relacionados al planeamiento, monitoreo y evaluación de los procesos cognitivos [9]. Perspectivas actuales sobre la metacognición la sitúan como un modelo alternativo a la idea de que el potencial para aprender es predeterminado, invariable y que no puede ser influenciado de manera significativa por medio de intervenciones pedagógicas [7]. Por ejemplo, Swanson [5] demostró que independientemente de las aptitudes generales, niños que recurrieron al uso de conductas más metacognitivas superaron a niños menos metacognitivos en la solución de problemas. Esto sugiere que el desarrollo de estas habilidades pueda tener un efecto compensatorio. Adicionalmente, las habilidades metacognitivas han sido asociadas con aprendizaje profundo [11] y con la transición hacia un estado de mayor autonomía en el aprendizaje [10]. El potencial asociado con el desarrollo de la metacognición en los ambientes educativos y los beneficios en términos de aprendizaje han acelerado la investigación en este campo [2] incluyendo estrategias específicas en la enseñanza de la química [4, 12-14]. Sin embargo, a pesar de afirmaciones sobre ambientes de aprendizaje que promueven el desarrollo de la metacognición [14, 15] la evidencia que muestre el impacto concreto de prácticas pedagógicas sobre este tipo de habilidades es muy limitada. Pareciera ser que la práctica común ha sido asumir que diseñar e implementar ambientes con el propósito de practicar habilidades metacognitivas, necesariamente conduce a su desarrollo. De hecho, uno de los factores que han limitado el progreso en el campo de la metacognición ha sido la carencia de instrumentos para su evaluación que sean simples, rápidos y automatizados [1]. En su mayor parte, el trabajo hecho en el campo de la evaluación de la metacognición se ha centrado en los auto-reportes tipo cuestionarios e inventarios [16-18] y éstos no han sido utilizados en el contexto de las ciencias naturales [7].

Dada esta coyuntura, nuestro grupo de investigación ha asumido en años recientes una vertiente de trabajo cuyo propósito es desarrollar métodos de evaluación del uso de la metacognición en ambientes de aprendizaje y de solución de problemas reales en el campo de la química. Como complemento a este trabajo hemos también diseñado y evaluado experiencias de aprendizaje que se enfocan en promover el uso de habilidades

metacognitivas. Sin ser exhaustivo, este reporte presenta un resumen del alcance de algunas de nuestras investigaciones.

II. Evaluación del uso de la metacognición

Inventario de Actividades Metacognitivas, MCAi. La evaluación del uso de la metacognición es una tarea particularmente desafiante sobre todo por su naturaleza *encubierta* y el carácter esquivo de sus manifestaciones [19]. Nuestro trabajo inicial en este frente produjo el Inventario de Actividades Metacognitivas, MCAi, cuyo diseño, validación y características psicométricas han sido ya reportadas [20]. Este es un instrumento de auto-reporte que consta de 27 ítems y usa una escala tipo Likert de cinco niveles con el propósito de explorar el uso del componente regulador de la metacognición (planeamiento, monitoreo y evaluación) en el contexto de la solución de problemas de química universitaria. La medición producida es el “*puntaje MCAi*” expresado como el porcentaje del máximo de puntos que se puede obtener en el inventario. Un mayor uso de estrategias metacognitivas se asocia con valores altos del puntaje. La confiabilidad del instrumento ha sido estimada en término de la consistencia interna y de medidas de test-retest mientras que la validación incluye la discusión de la validez en término de la definición del constructo [21]. Adicionalmente, el instrumento ha logrado discriminar de manera consistente entre grupos de diferentes características: estudiantes de primer y último año universitario y estudiantes de posgrado. La técnica de variables múltiples enfocada en el análisis de factores [22] no arrojó evidencia sobre la congruencia de la estructura interna con el marco teórico [4] utilizado para el diseño de los ítems del inventario (los tres subcomponentes reguladores: planeamiento, monitoreo y evaluación). Sin embargo, esto no es extraño cuando se trata de variables latentes y atribuimos esta ocurrencia a la alta interdependencia de las habilidades reguladoras, tal y como ha sido reportado por otros autores [23]. De manera global, nuestro reporte establece la robustez, validación para el propósito propuesto y la habilidad del instrumento de coleccionar datos de manera confiable. Aunque hemos utilizado el MCAi en posteriores estudios de nuestro grupo, un tema que aún demanda consideración es la verificación de sus cualidades psicométricas por otros investigadores; este proceso está actualmente en progreso.

IMMEX (Interactive MultiMedia Exercises). La descripción detallada de esta plataforma cibernética ha sido presentada en otras oportunidades [24-27] y ha sido ampliamente utilizada para recolectar información sobre ejecución y estrategia en situaciones de solución de problemas [28, 29]. Típicamente, IMMEX presenta a los participantes problemas abiertos que no pueden ser resueltos de manera algorítmica y utiliza un contexto que persigue hacer el problema significativo. Los participantes construyen su estrategia al navegar el espacio cibernético y seleccionar y analizar unidades de información que tienen a su disposición (información general—por ejemplo una biblioteca de términos—e información específica—por ejemplo, pruebas químicas y físicas). IMMEX utiliza un sistema de registro basado en tecnología HTML para capturar los ítems

seleccionados, la secuencia y el tiempo de uso. Esta información es procesada luego usando modelaje con redes neurales artificiales (ANN) que producen una serie de 36 nódulos topológicos basados en los patrones de selección de componentes del espacio problema. Estos nódulos son sujetos a modelaje con modelos ocultos de Markov (HMM) para reagruparlos en cinco patrones estratégicos. A su vez, con base en un estudio minucioso de sus propiedades hemos reducido éstos a tres niveles de uso de metacognición: IMMEX-Alto, IMMEX-Intermedio e IMMEX-Bajo. De esta manera, una vez entrenado con base en decenas de miles de ejecuciones el sistema permite que un individuo que ha resuelto el problema en línea sea clasificado de manera rápida en uno de los estos tres niveles de metacognición [30]. Esta evaluación concurrente tiene ventajas sobre métodos tradicionales que ya hemos reportado [29]: alto grado de automatización y eficiencia, susceptibilidad mínima al prejuicio humano y un ambiente de solución de problemas más naturalista pues los participantes no están bajo observación directa. Además de clasificar a los participantes de acuerdo a su desempeño metacognitivo, las soluciones en el ambiente IMMEX pueden ser modeladas usando Teoría de Respuesta de Ítems (IRT) lo que permite obtener una segunda medida para la evaluación: la habilidad de cada participante [31]. Este parámetro puede entenderse como una medida del nivel de dificultad de los problemas que un estudiante dado puede resolver. Siendo los problemas empleados reales y no algorítmicos, esta información permite asociar las habilidades metacognitivas con la habilidad para resolver problemas de mayor dificultad.

Estrategia de Multi-Métodos para la evaluación de la metacognición. En su revisión del estado de la evaluación de la metacognición, Veenman [1] enfatizó la urgencia de desarrollar metodologías que empleen más de un instrumento—*multi-métodos*—con el propósito de estudiar este constructo. Más allá, Veenman sugiere la superioridad de aquellos diseños evaluativos que combinan *diferentes tipos* de instrumentos administrados en *diferentes momentos*. Algunos estudios han utilizado este acercamiento pero se han limitado a campos como la lectura y sin haber hallado concordancia significativa entre los resultados obtenidos con ambos métodos [3]. Este tipo de evaluación en la enseñanza universitaria de las ciencias no había sido reportado hasta la publicación de nuestro trabajo [30]. El objetivo primordial de este trabajo fue desarrollar la evaluación combinando los dos instrumentos citados arriba: el MCAi como una medida tradicional, de auto-reporte y prospectiva, seguida por un instrumento automatizado y rápido, IMMEX, capaz de coleccionar información sobre estrategia de manera simultánea a la ejecución de la tarea, o sea, concurrente. En conjunto, estos instrumentos ofrecen información desde dos perspectivas: lo que los participantes reportan hacer cuando resuelven problemas y lo que realmente hacen cuando los resuelven. El MCAi genera un parámetro, el puntaje MCAi, mientras que IMMEX genera dos parámetros, el primero obtenido del modelaje con ANN y HMM, el nivel de uso de metacognición (*estrategia*) y el segundo, la habilidad del estudiante, obtenido usando IRT para el modelaje. En varias réplicas hemos establecido la correlación significativa entre los puntajes MCAi y los valores de habilidad, es decir, estudiantes que reportan ser más metacognitivos en sus estrategias tienen habilidad de resolver problemas reales de mayor grado de dificultad. Similarmente, la evidencia estadística apunta a que los grupos de estudiantes que han sido clasificados como más metacognitivos usando IMMEX

(IMMEX-Alto) presentan también mayor valor promedio en el puntaje MCAi y que la diferencia es estadísticamente significativa con aquellos grupos clasificados como de menor rendimiento en metacognición (IMMEX-Intermedio e IMMEX-Bajo). En conjunto, esta evidencia es indicativa de la convergencia entre los dos instrumentos un análisis que se puede paralelar a la validación de métodos químicos analíticos. Hemos propuesto que incluso en aquellos casos en que se observa divergencia entre la declaración de individuos (MCAi) y su despliegue real de actividades metacognitivas (IMMEX), la información es valiosa como diagnóstico e informativa para dirigir la instrucción. Por ejemplo, se podría esperar que la disposición hacia intervenciones de parte de estudiantes que son conscientes de la flaqueza de sus actividades metacognitivas (puntaje MCAi bajo y clasificación IMMEX-Bajo) sea diferente de la de aquellos que ignoran tal flaqueza (puntaje MCAi alto y clasificación IMMEX-Bajo). Este es un ejemplo de las formas en que esta metodología puede informar directamente la práctica del docente y beneficiar al estudiante. De esta manera, este multi-métodos presenta la ventaja de consumir poco tiempo de instrucción, es confiable y permite el análisis de gran número de participantes en un tiempo reducido. Además de ser una herramienta para la investigación y para la evaluación de intervenciones pedagógicas, como se ha mencionado, asiste en delinear un perfil de grupos de estudiantes e informa la práctica didáctica.

III. Desarrollo de las habilidades metacognitivas

Laboratorio cooperativo como promotor del uso de la metacognición. Aunque muchos científicos y educadores concuerdan en la relevancia de los laboratorios académicos, la evidencia que muestre una relación entre éstos y el aprendizaje, especialmente a nivel terciario, es escasa [32]. Nosotros decidimos estudiar la eficacia de un ambiente de aprendizaje en el laboratorio académico para promover el uso de la metacognición y el desarrollo de habilidades para resolver problemas de química [33]. El ambiente en escrutinio es un curso de laboratorio de química general universitaria basado en trabajo cooperativo diseñado dentro de un esquema de solución de problemas [34]. En términos generales, los estudiantes forman grupos de cuatro, reciben un objetivo experimental pero son ellos mismos quienes deciden los procedimientos y toman las decisiones experimentales bajo la guía de un instructor de laboratorio. Los proyectos generalmente son completados en cuatro semanas, no hay exámenes de ningún tipo, y los estudiantes preparan presentaciones orales y de carteles como parte de su evaluación. Para nuestra investigación usamos un diseño secuencial de métodos mixtos [35] que combina un componente cuantitativo (la estrategia de multi-métodos anteriormente presentada) con un componente cualitativo (en este caso, un estudio fenomenológico). A manera de ilustración del potencial de los métodos mixtos, se puede decir que el análisis cuantitativo corresponde a elucidar la ecuación química que describe una reacción (*qué ha cambiado*) mientras que el componente cualitativo sirve para descifrar el mecanismo de reacción, la ruta transformativa que lleva a la obtención de los productos (*cómo y por qué se han dado los*

cambios). El componente cuantitativo es un detector de los cambios generados por la intervención, en este caso la participación en el laboratorio cooperativo, y mide las variaciones en los parámetros de interés (en este caso los correspondientes a la estrategia de multi-métodos: puntaje MCAi, estrategia metacognitiva y habilidad para resolver problemas). En nuestro caso, usando la estrategia de multi-métodos logramos establecer que de acuerdo con sus estrategias en las soluciones de problemas de química en línea (calidad metacognitiva de la estrategia en IMMEX) los estudiantes en el laboratorio mostraron mayor uso de habilidades metacognitivas. Similarmente, este grupo demostró mayor proporción de problemas de mayor dificultad resueltos (habilidad según modelaje con IRT de sus soluciones IMMEX) que los estudiantes que no participaron de la intervención. Adicionalmente, a través pruebas pre y post intervención, se observó que los participantes en el laboratorio obtuvieron puntajes menores en el instrumento MCAi después de la experiencia pedagógica. Intuitivamente, este declive puede parecer contradictorio, sin embargo proponemos que en tiempos de retención cortos, el efecto de las experiencias metacognitivas es desplazar la referencia usada para contestar el cuestionario hacia un nivel más autocrítico produciendo puntajes menores. Hemos observado este mismo efecto en múltiples réplicas y con diferentes intervenciones. Del estudio cuantitativo hemos concluido que la experiencia en este tipo de ambiente de aprendizaje promueve el uso de habilidades metacognitivas de regulación y las habilidades para resolver problemas.

Desde una perspectiva práctica y no filosófica, la fenomenología es una tradición de investigación cualitativa que busca elucidar la esencia de una experiencia humana dada [36] a través de la descripción de la experiencia (o fenómeno) tal y como ha sido vivida por los participantes. Evidentemente, esta técnica ha sido subutilizada en el campo de la educación química, probablemente por los retos metodológicos que conlleva [37]. Nuestra propuesta es que la construcción de una descripción profunda de las experiencias académicas permite investigar información de otra manera inaccesible. El acceso a esta información es el relato de los participantes en la experiencia, es por ello que la principal fuente de datos en esta técnica es la entrevista [36]. En este estudio [33] el ambiente de laboratorio no tradicional es el *fenómeno vivido*. El estudio fenomenológico nos ha dado evidencia de cómo el ambiente de laboratorio ha logrado desarrollar la metacognición y la habilidad para resolver problemas. A partir de este trabajo proponemos que es la interacción social significativa y propositiva en combinación con la constante reflexión lo que permite a los estudiantes desarrollar las capacidades citadas. En un estudio fenomenológico relacionado pero independiente, hemos reportado como la participación de estudiantes de doctorado como instructores de laboratorio en este mismo ambiente de instrucción tiene un impacto positivo sobre su desarrollo como investigadores. Hemos demostrado la instanciación en este ambiente de actividades que promueven el desarrollo metacognitivo de los instructores de laboratorio y la sofisticación de sus perspectivas epistemológicas, dos ámbitos ampliamente relacionados con el desarrollo de la identidad científica y con la práctica investigativa [38, 39]. En resumen, la participación en este tipo de ambiente de aprendizaje promueve oportunidades para desarrollar habilidades intelectuales de orden superior en todos los participantes: estudiantes e instructores.

Intervención colaborativa para el desarrollo de la metacognición. Con la intención de explorar modificaciones curriculares de menor envergadura que, por ejemplo, la transformación súbita de un programa de laboratorio, hemos diseñado una intervención “de papel y lápiz” de corta duración e implementación sencilla [40]. Esta intervención se compone de tres fases que involucran al estudiante en trabajo colaborativo e individual que promueve la reflexión sobre los procesos y los productos de las estrategias de solución de problemas. Aunque la implementación se ha hecho en un laboratorio de química general, hemos escogidos no utilizar contenidos químicos para poder generalizar las conclusiones al ámbito mayor de la enseñanza de las ciencias. La primera etapa (~45 min) se desarrolla en duplas o triadas y comienza con un problema de lógica reportado en la literatura [41]. Este problema a pesar de ser *obvio* en una segunda lectura, es normalmente resuelto incorrectamente por factores asociados con descuidos metacognitivos. Este fallo en un problema que se vuelve aparentemente sencillo sirve de iniciador de la reflexión metacognitiva y engancha la atención del estudiante y la interacción con sus compañeros. A continuación los participantes leen una serie de puntos e indicaciones que les hace reflexionar sobre su estrategia y el papel del planeamiento, el monitoreo y la evaluación (regulación metacognitiva). La segunda etapa consiste en una tarea individual con un problema similar y otras indicaciones para la reflexión que los estudiantes entregan una semana más tarde. La premisa es que esta actividad les ayuda a cementar el aprendizaje en grupo. Finalmente, al regresar al laboratorio una semana más tarde, los estudiantes reciben y leen individualmente un documento en el que se describen los errores más comunes que el instructor ha encontrado en la solución grupal de la semana anterior. Esta investigación siguió un diseño cuasi-experimental, con grupos de control y tratamiento y evaluación pre y post intervención y fue ejecutada por duplicado. La evaluación utilizó el multi-métodos presentado anteriormente. La evidencia es consistente con un aumento de las habilidades metacognitivas regulatorias por parte del grupo de tratamiento. Proponemos que estos efectos son derivados de procesos que son independientes de la disciplina en estudio, por tanto, nuestra intención no es promover la adopción de una intervención o actividad específica sino identificar los procesos que pueden ser incorporados en la enseñanza de las ciencias con efectos similares. Esta evidencia apoya nuestras conclusiones previas sobre el beneficio de participar en interacciones sociales significativas y el efecto de la inducción de reflexión metacognitiva.

IV. Implicaciones y conclusiones

El objetivo central de este artículo es presentar una breve introducción al trabajo que nuestro grupo de investigación ha emprendido en torno al estudio de la metacognición en la enseñanza de la química. En este sentido nuestro trabajo ha hecho contribuciones en dos frentes: (1) la evaluación del uso de la metacognición y (2) el desarrollo y evaluación de ambientes o experiencias de aprendizaje que promueven el uso de la metacognición. En el primer campo hemos descrito el diseño, desarrollo y validación de una estrategia de multi-métodos que combina dos instrumentos que hemos descrito separadamente: el inventario

MCAi y el ambiente cibernético IMMEX. Este multi-métodos pone a disposición de investigadores e instructores un instrumento de uso rápido, confiable, robusto y automatizado que puede analizar un número grande de participaciones en un tiempo reducido. Al momento de esta publicación este es el único multi-método reportado para uso en ciencias naturales universitarias. En el segundo ámbito, hemos documentado la eficacia de diferentes tipos de intervenciones de instrucción para promover el uso de la metacognición y las habilidades en solución de problemas químicos. Además, los estudios cualitativos han arrojado evidencia sobre los procesos que subyacen esos efectos: la interacción social significativa e intencionada y la inducción hacia la reflexión metacognitiva. Larkin [42] ha sugerido que el inicio de la reflexión sobre uno mismo y las conductas propias en solución de problemas puede iniciarse por medio de ser cuestionado por otros. En nuestros estudios, estas estrategias han logrado hacer que los participantes se detengan y razonen y les han ayudado a ser más reflexivos y conscientes de sus habilidades. Proponemos que estas estrategias preparan a los estudiantes para su futuro aprendizaje a través de la adaptación de su conocimiento a situaciones nuevas.

Consideramos que uno de los objetivos globales de la educación debe ser promover el aprendizaje autónomo. Nuestro trabajo sugiere que se puede progresar hacia este objetivo a través de la implementación de ambientes de aprendizaje tales como los presentados en nuestras intervenciones. Las habilidades metacognitivas desarrolladas durante las actividades colaborativas son transferibles a la solución individual de tareas no relacionadas con la intervención misma. Aunque los resultados que hemos presentado son para implementaciones individuales y aisladas, es razonable sugerir la hipótesis de que se observarían avances aún mayores si los estudiantes son expuestos de manera rutinaria a este tipo de ambientes de aprendizaje. Como corolario, nuestro trabajo nos ha llevado a coleccionar evidencia sobre la eficacia de la instrucción de laboratorio, un campo de la educación científica en que el progreso ha sido escaso.

V. Referencias

- [1] Veenman, M. V. J. In: *The assessment of metacognitive skills: what can be learned from multi-method designs?* Artelt, C., Moschner, B., (Eds.), *Lernstrategien und Metakognition: Implikationen für Forschung und Praxis*, Waxmann, Berlin, 2005; pp 3-29.
- [2] Georgiades, P., *International Journal of Science Education* **2004**, 26, 365-383.
- [3] Pintrich, P. R., *Theory into Practice* **2002**, 41, 219-225.
- [4] Schraw, G.; Brooks, D. W.; Crippen, K. J., *Journal of Chemical Education*. **2005**, 82, 637-640.

- [5] Swanson, L. H., *Journal of Educational Psychology* **1990**, 82, 306-314.
- [6] Flavell, J. H., *American Psychologist* **1979**, 34, 906-911.
- [7] Thomas, G.; Anderson, D.; Nashon, S., *International Journal of Science Education* **2008**, 30, 1701-1724.
- [8] Brown, A. In: *Metacognition, executive control, self-regulation, and other more mysterious mechanisms*, Weinert, F. E., Kluwe, R. H., (Eds.), Metacognition, Motivation and Understanding, Lawrence Erlbaum Associates, Inc., New Jersey, 1987, pp 65-116.
- [9] Schraw, G. In: *Promoting General Metacognitive Awareness*; Hartman, H. J., (Eds.), Metacognition in Learning and Instruction: Theory, Research and Practice; Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2001; pp 3-16.
- [10] Schraw, G.; Crippen, K. J.; Hartley, K., *Research in Science Education* **2006**, 36, 111-139.
- [11] Yore, L. D.; Treagust, D. F., **2006**, 28, 291-314.
- [12] Francisco, J. S.; Nicoll, G.; Trautmann, M., *Journal of Chemical Education* **1998**, 75, 210-13.
- [13] Rickey, D.; Stacy, A. M., *Journal of Chemical Education*. **2000**, 77, 915.
- [14] Tsai, C., *Journal of Chemical Education* **2001**, 78, 970-974.
- [15] Zion, M.; Michalsky, T.; Mevarech, Z., *International Journal of Science Education* **2005**, 27, 957-983.
- [16] Pintrich, P. R.; Smith, D. A.; Garcia, T.; McKeachie, W. J., *Educational and Psychological Measurement* **1993**, 53, 801-813.
- [17] Weinstein, C. E.; Schulte, A. C.; Palmer, D. P., *Learning and study strategies inventory*; ed. H & H Publishing: Clearwater, FL, 1987.
- [18] Spoerer, N.; Brunstein, J. In: *Diagnostik von selbstgesteuertem Lernen: Ein Vergleich zwischen Fragenbogen- und Interviewverfahren*, Artelt, C., Moschner, B., (Eds.), *Lernstrategien und Metakognition: Implikationen fuer Forschung und Praxis*, Waxman, Muenster, 2005; pp 43-63.
- [19] Thomas, G. P.; McRobbie, C. J., *Journal of Research in Science Teaching* **2001**, 38, 222-259.
- [20] Cooper, M. M.; Sandi-Urena, S. *Journal of Chemical Education*. **2009**, 86, 240-245.

- [21] Thorndike, R. M., *Measurement and evaluation in psychology and education*, Pearson Education, Inc.: Upper Saddle River, NJ, 2005.
- [22] Manly, B. F. J. *Multivariate statistical methods: a primer*, Chapman and Hall: New York, 1986.
- [23] Schraw, G.; Dennison, R. S., *Contemporary Educational Psychology* **1994**, 19, 460-475.
- [24] Underdahl, J.; Palacio-Cayetano, J.; Stevens, R. H., *Learning and Leading with Technology*. **2001**, 28, 26-31.
- [25] Stevens, R. H.; Palacio-Cayetano, J., *Journal of Cell Biology Education*. **2003**, 2, 162-178.
- [26] Stevens, R. H.; Johnson, D. F.; Soller, A., *Cell Biology Education*. **2005**, 4, 42-57.
- [27] Cooper, M. M.; Stevens, R. H.; Holme, T. In: *Assessing Problem Solving Strategies in Chemistry using the IMMEX System, Proceedings from the National STEM Assessment of Student Achievement Conference*, 2007, pp 118-129.
- [28] Case, E. L.; Cooper, M. M.; Stevens, R. H. *Journal of College Science Teaching*. **2007**, 36, 42-47.
- [29] Cooper, M. M.; Cox, C. T.; Nammouz, M.; Case, E.; Stevens, R. H. *Journal of Chemical Education*. **2008**, 85, 866.
- [30] Cooper, M. M.; Sandi-Urena, S.; Stevens, R. H., *Chemistry Education Research and Practice*. **2008**, 9, 18-24.
- [31] Hambleton, R. K.; Swaminathan, H.; Rogers, H. J., *Fundamentals of item response theory*, Sage Publications: Newbury Park, CA, 1991.
- [32] Hofstein, A.; Mamlok-Naaman, R., *Chemistry Education Research and Practice*. **2007**, 8, 105-107.
- [33] Sandi-Urena, S.; Cooper, M. M.; Gatlin, T. A.; Bhattacharyya, G.; Stevens, R. H. Submitted.
- [34] Cooper, M. M., *Cooperative chemistry laboratory manual*, McGraw-Hill: New York, NY, 2009.
- [35] Creswell, J. W.; Plano Clark, V. L., *Designing and Conducting Mixed Methods Research*, Sage Publications: Thousand Oaks, CA, 2007, pp 275.

- [36] Patton, M. Q., *Qualitative Research & Evaluation Methods*, Sage Publications: Thousand Oaks, CA, 2002.
- [37] Casey, K. In: *Theoretical frameworks for research in chemistry/science education*, Bodner, G. M., Orgill, M., (Eds.), Phenomenology, Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ, 2007, pp 122-131.
- [38] Hunter, A.; Laursen, S. L.; Seymour, E., *Science Education*. **2007**, *91*, 36-74.
- [39] Baxter Magolda, M. B., *Journal of Student College Development*. **2001**, *42*, 520-534.
- [40] Sandí-Ureña, S.; Cooper, M. M.; Stevens, R. H., *International Journal of Science Education* **2010**.
- [41] Davidson, J. E.; Deuser, R.; Sternberg, R. J., In: *The role of metacognition in problem solving*, Metcalfe, J., Shimamura, A. P., (Eds.), Metacognition: Knowing about knowing, MIT Press, Cambridge, MA, 1995, pp 207-226.
- [42] Larkin, S., *Research in Science Education*. **2006**, *36*, 7-27.