

Caracterización del discurso químico de un grupo de profesores en formación al modelar los equilibrios para la formación de complejos

Characterizing the Chemical Discourse of a Group of Preservice Teachers while Modeling Complex Formation Equilibria

Mayerly Rodríguez Hernández¹ 

Yolanda Ladino Ospina² 

Diego Alexander Blanco Martínez³ 

Cómo citar este artículo:

Rodríguez Hernández, M., Ladino Ospina, Y. y Blanco Martínez, D. A. (2026). Caracterización del discurso químico de un grupo de profesores en formación al modelar los equilibrios para la formación de complejos. *Boletín P.P.D.Q.*, (73), 10-27.

Resumen

Este trabajo tuvo como objetivo caracterizar el discurso químico de profesores en formación de la Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional, en torno al estudio del equilibrio de complejos, mediante una

1 Licenciada en Química, profesora en formación. mrodriguezh@upn.edu.co

2 Doctora en Educación. Docente, Universidad Pedagógica Nacional. ladino@pedagogica.edu.co

3 Magíster en Ciencias-Química. Docente, Universidad Pedagógica Nacional. dablanca@pedagogica.edu.co

secuencia didáctica que integró teoría, modelación y práctica experimental. El proyecto se llevó a cabo con estudiantes de quinto y sexto semestre, en los espacios académicos de Sistemas Inorgánicos II y Métodos de Análisis Químico I. Se abordó desde los niveles molar y molecular del conocimiento químico y las dimensiones estructura/composición y energía, de acuerdo con el modelo propuesto y adaptado por Jensen (1998). La metodología incluyó la construcción de una rúbrica para orientar el diseño de una prueba diagnóstica, una sesión sobre los equilibrios simultáneos aplicados a la solubilidad de sales en medios amortiguados y la modelación con Excel, y una práctica de laboratorio en la que se observaron fenómenos de formación y de disociación de complejos. En conjunto, se evidenció que el discurso químico de los estudiantes evoluciona desde un enfoque descriptivo hacia una comprensión más integrada, que combina niveles de representación y dimensiones conceptuales. De esta manera, el desarrollo del discurso químico no ocurre de forma espontánea, sino que debe ser promovido mediante experiencias didácticas estructuradas, que incluyan herramientas de modelación, análisis de datos y actividades experimentales. La integración de estos elementos permitió fortalecer las habilidades de explicación, argumentación y predicción, fundamentales para la enseñanza y comprensión de los equilibrios simultáneos en los complejos de coordinación.

Palabras clave

discurso químico; formación de profesores en química; equilibrio de complejos; representaciones molar y molecular; dimensiones estructura y energía

Abstract

This work aimed to characterize the chemical discourse of pre-service teachers in the Chemistry Degree program at the Universidad Pedagógica Nacional, focusing on the study of complex equilibrium through a didactic sequence that integrated theory, modeling, and experimental practice. The project was carried out with fifth- and sixth-semester students enrolled in the courses Inorganic Systems II and Methods of Chemical Analysis I. It was approached from the molar and molecular levels of chemical knowledge and the structure/composition and energy dimensions, according to the model proposed and adapted by Jensen (1998). The methodology included the construction of a reference table to guide the design of a diagnostic test, a session on simultaneous equilibria applied to the solubility of salts in buffe-

red media and modeling with Excel, and a laboratory practice where phenomena of complex formation and dissociation were observed. Overall, it was evident that students' chemical discourse evolved from a descriptive approach to a more integrated understanding that combines levels of representation and conceptual dimensions. Thus, the development of chemical discourse does not occur spontaneously, but must be promoted through structured didactic experiences that include modeling tools, data analysis, and experimental activities. The integration of these elements helped strengthen explanation, argumentation, and prediction skills, which are fundamental for teaching and understanding simultaneous equilibria in coordination complexes.

Keywords

chemical discourse; preservice chemistry teachers; complex equilibrium; molar and molecular representations; structural and energetic dimensions

Introducción

Los complejos de coordinación son especies químicas que se forman por la interacción entre un ion metálico central y uno o varios ligandos. Sus características y estabilidad dependen de factores cinéticos y termodinámicos. El estudio de los complejos de coordinación y su equilibrio es un punto clave en la formación de los presentes y futuros profesores de química, ya que permite comprender la interacción entre iones metálicos y diferentes ligandos, así como la estabilidad de estos sistemas en disolución acuosa. Desde 1893, cuando Alfred Werner formuló la teoría de coordinación, que explica la geometría y forma de estos compuestos (Housecroft y Sharpe, 2018), los complejos han sido objeto de estudio por su relevancia en áreas como la catálisis, la bioquímica y la química

ambiental. En el contexto educativo, su enseñanza debe trascender la memorización para promover una comprensión profunda de los fenómenos químicos que intervienen.

Este proyecto se enmarca en el modelo lógico del conocimiento químico propuesto por Jensen (1998), que organiza el saber en niveles de representación (molar, molecular y eléctrico) y en dimensiones (composición/estructura, energía y tiempo). En particular, se hace énfasis en los niveles molar y molecular, así como en las dimensiones estructura/composición y energía para vincular el lenguaje simbólico y visual con lo que ocurre a nivel microscópico y submicroscópico. Desde esta perspectiva, el discurso químico se convierte en una herramienta fundamental para el aprendizaje, ya que permite argumentar científicamente,

organizar el conocimiento y conectar lo observable con lo teórico mediante símbolos, modelos y representaciones.

En este sentido, la enseñanza de los equilibrios de formación de complejos requiere integrar conceptos fundamentales de la química de coordinación con herramientas didácticas que faciliten su comprensión. Factores cinéticos y termodinámicos determinan la formación y estabilidad de los complejos, por lo que resulta esencial que los presentes y futuros docentes comprendan las redes conceptuales implicadas. Uno de los retos centrales es articular el conocimiento químico con modelos químico-matemáticos que describan los equilibrios simultáneos que ocurren, considerando además parámetros como el efecto del pH sobre la solubilidad.

Por consiguiente, se construyó una secuencia de actividades que se implementó en los espacios académicos de Métodos de Análisis Químico y Sistemas Inorgánicos II del programa de Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional. Esta propuesta contribuyó en el discurso químico de los participantes mediante el análisis teórico, la interpretación de datos y el desarrollo de modelos que describen el comportamiento de los equilibrios para la formación de complejos de coordinación. Además, se incorporó el uso de las TIC como Excel, herramienta que permite codificar, organizar y visualizar los efectos de distintos parámetros sobre la estabilidad de los complejos (Masterton

y Hurley, 2020). Este enfoque responde también al alineamiento constructivo (Biggs, 2003), que promueve la coherencia entre los objetivos de aprendizaje, las actividades de aula y los criterios de evaluación, lo que asegura una formación integral de los futuros docentes de química.

El proyecto buscó dar respuesta a la pregunta ¿Qué caracteriza el discurso químico de un grupo de profesores de Química en formación de la Licenciatura en Química en los niveles molar y molecular, y en las dimensiones estructura/composición y energía, al abordar situaciones teórico-prácticas relacionadas con la descripción de modelos químico-matemáticos relacionados con el efecto de la formación de complejos y el pH en la solubilidad? Para ello se propuso como objetivo general caracterizar el discurso químico de un grupo de profesores en formación cuando formulan modelos químico-matemáticos al describir los equilibrios simultáneos implicados en el efecto de la formación de complejos y el pH en la solubilidad, integrando los niveles molar y molecular desde las dimensiones estructura/composición y energía, mediante una secuencia didáctica apoyada en el uso de herramientas digitales.

Metodología

Este proyecto se desarrolló en la Universidad Pedagógica Nacional, en el marco de la práctica educativa del programa de Licenciatura en Química. Se implementó

con un grupo de veinticuatro profesores en formación de Sistemas Inorgánicos II, SI-II y veinticuatro profesores en formación de Métodos de Análisis Químico I, MAQ-I.

El desarrollo del proyecto se centró en la caracterización del discurso químico de los profesores de Química en Formación PF y se enfocó en los niveles molar y molecular y en las dimensiones de estruc-

tura/composición y energía. Con base en esto, se construyeron unas unidades de análisis de la estructura lógica de la Química según Jensen (1998), con el propósito de orientar tanto la organización conceptual del contenido como la construcción de los criterios de evaluación alineados con estos niveles y dimensiones del discurso químico (tabla 1).

Tabla 1. Unidades de análisis de los niveles y dimensiones del discurso químico

Nivel/ Dimensión	Dimensión estructura/composición	Dimensión energía
Nivel molar	Identificar cómo la naturaleza del ligando y del catión determinan las propiedades de los complejos de coordinación, en particular las tonalidades que se dan en disoluciones acuosas.	Interpretar los cambios observables (como la coloración o tonalidades en disolución acuosa) como resultado de variaciones de la energía de estabilización del campo cristalino.
Nivel molecular	Explicar y predecir la estructura y propiedades de los complejos de coordinación teniendo en cuenta la serie espectroquímica para los ligandos y la geometría de acuerdo con el número de coordinación.	Describir y modelar sistemáticamente los equilibrios simultáneos implicados teniendo en cuenta el efecto del pH y la formación de complejos en la solubilidad.

Fuente: adaptado de Jensen (1998).

El proceso metodológico inició con la estructuración de una prueba diagnóstica orientada desde esas unidades de análisis. Cada pregunta de la prueba fue diseñada para evaluar un nivel y una dimensión alineada con la tabla 1 y con los indicadores de desempeño definidos, se estructuró por tres relaciones conceptuales asociadas a los niveles y dimensiones objeto de caracterización: color y campo cristalino, geometría y número de coordinación, y estabilidad mediante sus constantes de

formación. Esta prueba fue aplicada a los profesores de Química en formación con el fin de identificar su comprensión inicial de los equilibrios de complejos de coordinación. Posteriormente, se desarrolló una intervención educativa sobre los equilibrios simultáneos de complejos, destacando cómo el pH influye en su solubilidad y estabilidad. Como material complementario, se les compartió una guía paso a paso que consolidaba los contenidos trabajados e incluía un manual para la incorporación

del modelo químico-matemático construido en una hoja de cálculo de Excel, con un sistema asignado a cada estudiante o grupo como actividad de profundización.

Como parte de la secuencia didáctica diseñada, los estudiantes trabajaron sobre sistemas reales de equilibrio de complejos, considerando: la solubilidad de una sal metálica, la especiación ácido-base del ligando, y la formación de uno o más complejos metálicos. Esta actividad buscó evaluar la capacidad de los futuros licenciados para modelar sistemas químico-matemáticos en función del pH, integrando niveles de representación, algoritmos matemáticos y conceptos termodinámicos.

Se implementó una práctica de laboratorio enfocada en la observación experimental de equilibrios de complejos, en la que se observaron fenómenos como los cambios de color asociados a las transiciones electrónicas tipo d-d en particular. A partir de esta experiencia, se diseñaron preguntas orientadoras para la elaboración de un informe final que permitió valorar la apropiación del discurso químico en los niveles y dimensiones establecidos.

Para analizar la información recolectada de las tres actividades implementadas se construyó la rúbrica de evaluación que se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. Indicadores de desempeño para caracterizar el discurso químico

Nivel/ Dimensión	Indicador de Desempeño	Escala de valoración		
		Bajo	Básico	Alto
Molar/ Energía	Interpreta experimentalmente los cambios de coloración como una manifestación del equilibrio de formación de complejos.	No relaciona los cambios observables con el equilibrio químico.	Reconoce que los cambios de color se relacionan con la manifestación del equilibrio de formación de complejos, pero presenta dificultades para explicar cómo la interacción con la radiación electromagnética genera transiciones electrónicas y su vinculación con el campo cristalino.	Explica de forma clara y fundamentada cómo los cambios de color hacen evidente el equilibrio químico de formación de complejos, relacionando las transiciones electrónicas con la energía del campo cristalino y su interacción con la radiación electromagnética.

Nivel/ Dimensión	Indicador de Desempeño	Escala de valoración		
		Bajo	Básico	Alto
Molecular/ Estructura	Representa y explica las estructuras y propiedades de los complejos de coordinación con base en la serie espectroquímica.	Representa los complejos sin precisión estructural y sin conexión con la teoría del campo cristalino ni la serie espectroquímica.	Utiliza representaciones básicas, pero con dificultad para vincularlas con la teoría del campo cristalino en relación con la serie espectroquímica.	Emplea representaciones correctas y las relaciona con la teoría del campo cristalino y la serie espectroquímica.
Molar/ Estructura	Identifica la naturaleza de las distintas especies químicas presentes en el sistema, tales como el ion metálico, ligando, ligandos auxiliares y el efecto del pH.	Describe de forma superficial o incorrecta la función del ligando.	Reconoce el papel del ligando, pero tiene dificultades para explicar su influencia en la estabilidad.	Explica detalladamente cómo las propiedades del ligando afectan la formación y estabilidad de los complejos.
Molecular/ Energía	Describe de manera secuencial los equilibrios presentes en el sistema con sus respectivas constantes de formación y formula los diferentes factores de formación o protonación, tales como protonación del ligando (FHA o FHM) formación del complejo metal-ligando (FLM)	No identifica los equilibrios ni los factores que intervienen en la formación de complejos.	Reconoce algunos equilibrios del sistema, pero presenta errores en el uso de las constantes y la relación entre los factores de formación.	Describe correctamente los equilibrios secuenciales y explica con claridad el efecto del pH y la protonación en la formación de complejos.

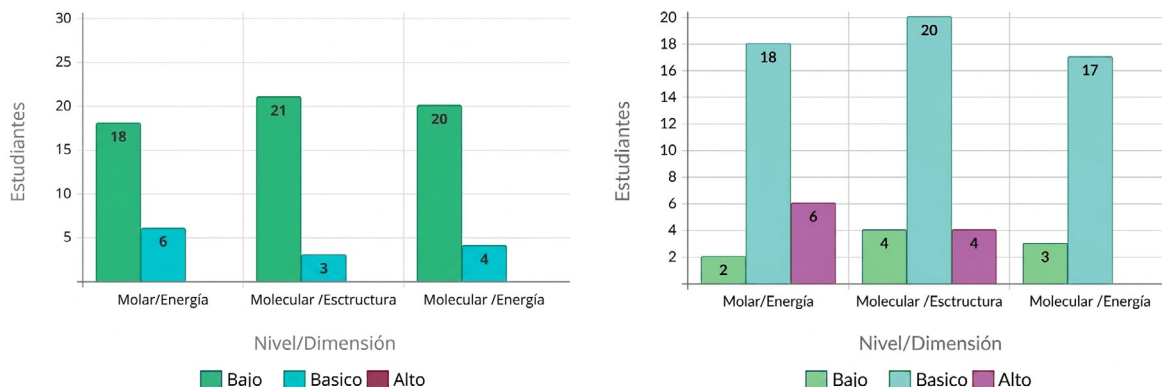
Fuente: elaboración propia.

Resultados y discusión

Los resultados de la prueba diagnóstica permitieron explorar cómo los profesores de Química en formación representan y explican aspectos relacionados con la formación de complejos de coordinación,

específicamente en los niveles molar en la dimensión energía y en el nivel molecular en las dimensiones de estructura/composición y energía.

En la gráfica 1 se presenta el análisis de los resultados obtenidos.



Gráfica 1. Desempeños en las relaciones entre los niveles y dimensiones en la prueba diagnóstica a) para el grupo de SI-II y b) para el grupo de MAQ-II

En el grupo de SI-II, como se observa en la gráfica 1a, entre 18 y 21 profesores en formación mostraron un nivel básico de desempeño en todas las relaciones entre los niveles y dimensiones del discurso, aunque con diferencias conceptuales marcadas. Por ejemplo, en el nivel molar en la dimensión Energía para la relación sobre color de los complejos, basado en la teoría del campo cristalino, 18 estudiantes identificaron que el color observado se relaciona con el ligando, pero sin explicar la relación entre la intensidad del campo generado por el ligando y la magnitud de la transición energética (Δ_0). Una respuesta recurrente fue: “el color depende del ligando, porque algunos tienden a generar colores más intensos que otros”, lo cual refleja una observación sin una articulación con la idea de absorción de luz visible como resultado de transiciones electrónicas d-d inducidas por el campo del ligando, por lo que se infiere que hay confusión entre la longitud de onda absor-

bida y el color percibido, así como dificultades para explicar por qué los ligandos de campo fuerte generan colores diferentes a los de campo débil. Este tipo de respuesta revela una comprensión parcial desde el punto de vista teórico. La serie espectroquímica y la teoría del campo cristalino, que fundamentan esta pregunta, no aparecen como marcos explicativos en la mayoría de las respuestas del grupo (Cotton y Wilkinson, 1999).

Una situación similar se presentó en las preguntas sobre geometría y número de coordinación. En este caso, para el nivel molecular en la dimensión energía, 21 estudiantes del mismo grupo describieron estructuras como “tetraédrica” u “octaédrica”, pero sin justificar su elección a partir de factores estructurales como el tamaño del ligando, la densidad electrónica, o el número de coordinación más estable para el ion metálico. Una respuesta ilustrativa afirma: “es octaédrica con el ligando

amoníaco porque se va a dejar rodear por seis ligandos, ya que la mayoría de los complejos tienden a una coordinación octaédrica". Si bien hay un reconocimiento del patrón geométrico, falta una argumentación que integre teoría del campo cristalino o el impedimento estérico del ligando para explicar qué tipo de geometría adoptaba el complejo. Esto indica que el discurso químico en el nivel molecular aún no se ha consolidado como un lenguaje de explicación causal. En este caso, el uso del lenguaje químico no es incorrecto, pero su valor explicativo es superficial. Como plantean Mortimer y Scott (2003), para que un estudiante construya significados profundos necesita articular múltiples niveles de representación mediante el lenguaje disciplinar, lo cual aún no se observó plenamente en este nivel.

Por otra parte, para la relación de estabilidad, el patrón de respuestas confirmó la tendencia hacia un discurso aún limitado en el nivel molecular, en la dimensión de energía. Aquí, 20 estudiantes mantuvieron un nivel bajo y solo 4 lograron un nivel básico. Las respuestas suelen ser directas, con afirmaciones como: *"el complejo más estable es el que tiene el ligando cianuro, porque este es un ligando de campo fuerte, spin bajo y por eso sus betas son mayores"*. Esta idea no es del todo errónea, pero si bien se identificaron correctamente los complejos más estables (mayor $\log \beta$), no justificaron esta estabilidad desde factores como la carga y el tamaño del ion

metálico, la carga del ligando o la naturaleza de la interacción metal-ligando. Según los indicadores definidos, un desempeño alto en esta dimensión implicaría explicar cómo y por qué el complejo con el ion CN^- y el ion Cd^{2+} presenta mayor estabilidad en comparación con el complejo con el NH_3 y el ion Zn^{2+} , incorporando conceptos como tamaño iónico, densidad electrónica y formación de enlaces coordinados más fuertes. La ausencia de estos elementos teóricos sugiere una comprensión parcial del equilibrio químico aplicado a sistemas de coordinación (Housecroft y Sharpe, 2018).

En contraste, el grupo de MAQ-I, como se observa en la gráfica 1b, mostró un mayor dominio del discurso químico. En la relación sobre color y naturaleza del ligando, 16 profesores en formación se ubicaron en nivel básico y seis en nivel alto. Una respuesta expresa: *"el color depende del campo que crean los ligandos; ligandos de campo débil aumentan la longitud de onda de máxima absorbida y Δ_0 disminuye, mientras que con los ligandos de campo fuerte pasa lo contrario, hay una relación inversamente proporcional"*. Esta afirmación integra adecuadamente la teoría del campo cristalino, al relacionar la idea de que un mayor valor de Δ_0 implica absorción de luz de mayor energía y, por tanto, percepción de colores distintos. Aquí se observa una comprensión que vincula el fenómeno observable con una representación submicroscópica, cumpliendo con la lógica de

integración que propone Jensen (1998) para alcanzar niveles discursivos complejos.

Por otro lado, 20 profesores en formación permanecieron en el nivel básico en la justificación de la geometría de los complejos. Aunque muchos identificaron correctamente las estructuras octaédrica y tetraédrica, las explicaciones carecieron de sustento teórico. Una respuesta común fue: *“No tengo claridad como las propiedades de los ligandos influyen en la geometría, si pensaría que los ligandos de campo fuerte que causan menos repulsión estérica, permitiendo que el complejo sea más estable”*. Esta afirmación no explica por qué esa geometría es más favorable en términos energéticos, ni hace alusión al ion metálico o a la influencia estérica de los ligandos. Se confirma así que aunque los profesores en formación implementan una representación estructural correcta, su nivel de argumentación aún es limitado. De acuerdo con la dimensión molecular/estructura, las explicaciones deberían retomar conceptos como el tipo de campo generado por el tipo de ligando, orbitales disponibles, y repulsión electrónica entre pares de electrones de los ligantes y el ion metálico (Bodner y Domin, 2000).

En la relación de la estabilidad, 17 estudiantes alcanzaron el nivel básico y 4 lograron un nivel alto. Las respuestas de este grupo fueron más fundamentadas conceptualmente, como lo demuestra esta afirmación:

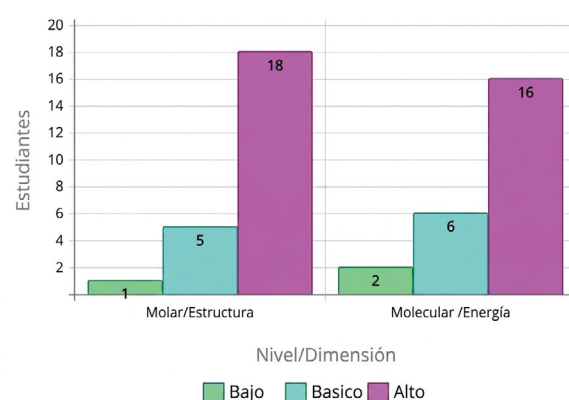
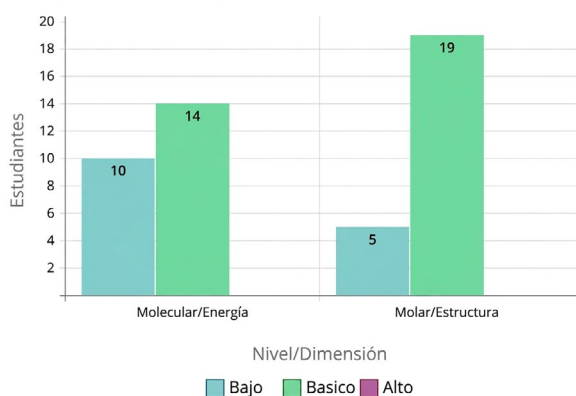
Aunque ambos ligandos son de campo fuerte (spin bajo), el complejo de cadmio II con el ligando cianuro tiene una β_4 mucho más alta. Esto se debe a la carga del ligando, ya que es un ligando aniónico, lo que favorece una interacción electrostática más fuerte con el catión Cd^{2+} que NH_3 (ligando neutro) con Zn^{2+} .

Esta explicación reconoce la constante formación global de un complejo como un parámetro termodinámico, pero no detalla los factores que podrían contribuir a ese valor, como el tamaño del ion metálico o la naturaleza del enlace metal-ligando; aunque hay avances en la dimensión energía, esta sigue siendo la que más presenta desafíos al momento de explicarla. Como argumenta Gilbert (2006), muchos estudiantes pueden usar términos científicos sin haber interiorizado su funcionamiento conceptual, lo que produce discursos técnicamente correctos pero frágiles desde el punto de vista explicativo.

En conjunto, este análisis confirma que el discurso químico de los profesores en formación presenta características distintas según el nivel de formación. El grupo SI-II semestre transita aún por etapas descriptivas con reducida articulación conceptual, mientras que el de MAQ-I comienza a construir explicaciones causales con apoyo en modelos teóricos, aunque persisten falencias en el nivel molecular en la dimensión

de energía. Estos resultados coinciden con lo planteado por Jensen (1998) y Bodner y Domin (2000), quienes señalan que el paso de la observación a la explicación

exige procesos de mediación didáctica sostenida, en los que los estudiantes aprendan no solo a describir lo que ven, sino a explicar por qué sucede.



Gráfica 2. Desempeños en las relaciones entre los niveles y dimensiones en el planteamiento de los equilibrios simultáneos a) para el grupo de SI-II y b) para el grupo de MAQ-II

En la gráfica 2a, se observa que el grupo de SI-II, en el nivel molar en la dimensión estructura 19 profesores en formación se ubican en un nivel básico y 5 en un nivel bajo; en el nivel molecular, en la dimensión energía 14 se encuentran en un nivel básico y 10 en un nivel bajo. Algunos de los sistemas abordados fueron CdS/HCN , $\text{ZnC}_2\text{O}_4/\text{NH}_3$ y $\text{Ag}_3\text{AsO}_4/\text{etilendiamina}$.

En el caso del sistema CdS/HCN , con un $\log \beta_4$ de 18,78 para el ion $[\text{Cd}(\text{CN})_4]^{2-}$, el análisis de los profesores en formación permitió reconocer cómo el incremento del pH favorece la disponibilidad del ligando CN^- a partir de su base conjugada. Se dedujeron correctamente los factores de

especiación (F_{HM}) del HCN y el factor de formación del complejo (F_{LM}), integrando la relación entre la constante de acidez y la estabilidad del complejo. En un documento se afirma que "cuando el pH es bajo hay más HCN, lo que limita la formación del complejo; a medida que sube el pH se genera más CN^- libre, y eso permite la formación progresiva de $[\text{Cd}(\text{CN})_4]^{2-}$ ". Aunque esta explicación articula de forma funcional el comportamiento del sistema, no se discute por qué el ion CN^- actúa como ligando de campo fuerte ni cómo estabiliza el ion metálico desde el modelo de campo cristalino, lo cual limita el alcance del análisis en la dimensión energética

(Housecroft y Sharpe, 2018). En términos de representación, las gráficas mostraban correctamente la transición del ion Cd^{2+} libre y la formación del complejo, pero la interpretación aún estaba centrada en la observación directa, sin una explicación teórica que referenciará las constantes de formación y el comportamiento estructural de los complejos.

El sistema $\text{Zn}_2\text{C}_2\text{O}_4/\text{NH}_3$, trabajado con $\log \beta_4 = 9,46$, implicaba representar la transición del ion libre Zn^{2+} a el ion $[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$. Los profesores en formación lograron deducir y representar gráficamente cómo el NH_3 se encuentra protonado a pH ácido, lo cual impide la coordinación con el ion metálico. En la explicación se menciona: *"la base conjugada NH_3 solo está libre en pH básico, por eso en medio ácido no se forma complejo"*. Esta afirmación, aunque acertada, no profundiza en el análisis energético ni estructural: no se menciona por qué el ion Zn^{2+} adopta una geometría tetraédrica y no octaédrica. Así, el desempeño se mantuvo en nivel básico tanto en lo molar como en lo molecular. Según Jensen (1998), el desarrollo del discurso químico requiere que los estudiantes pasen de nombrar transformaciones a explicar causalmente sus implicaciones estructurales y energéticas, lo cual aún no se evidencia completamente en este grupo.

Otro de los sistemas fue el de $\text{Ag}_3\text{AsO}_4/\text{etilendiamina}$, que involucraba un ligando bidentado (en) con $\log \beta_2 = 7,70$. En la

deducción matemática se incluyeron todos los factores de especiación para la etilendiamina (FHM), la especiación del ácido arsénico (FHA) y el cálculo del FLM . En el análisis se afirma: *"la etilendiamina se protona a pH bajo, y por eso solo puede formar complejos en medio neutro o básico; la función puntera muestra que la concentración máxima del complejo se da entre pH 6.8 y 6.85"*. Esta interpretación muestra un avance notable en la representación del sistema, aunque no se discute la estructura del complejo ni su geometría preferencial. No obstante, el grupo en general no profundizó en el impacto estérico del ligando ni en la diferencia en estabilidad entre ligandos mono y bidentados, lo cual muestra un discurso químico aún en proceso de consolidación (Gilbert, 2006).

Por otro lado, en el grupo de MAQ-II , como se observa en la gráfica 2(b), 18 profesores en formación alcanzaron un desempeño alto en el nivel molar en la dimensión estructura y 16 en el nivel molecular en la dimensión energía, lo que indica un dominio avanzado tanto en la representación de los fenómenos observables como en la explicación de estos procesos desde principios termodinámicos y estructurales. Algunos de los sistemas abordados fueron: $\text{Cd}_3(\text{AsO}_4)_2 / \text{HCN}$, $\text{Ag}_2\text{C}_2\text{O}_4 / \text{etilendiamina}$.

En el sistema $\text{Cd}_3(\text{AsO}_4)_2 / \text{HCN}$, los profesores en formación construyeron correctamente el sistema de ecuaciones. En el análisis exponen que *"la concentración de*

CN⁻ libre depende directamente del pH, siendo mínima en condiciones ácidas, y por eso la formación de los complejos aumenta solo a partir de pH 9". Esta afirmación articula correctamente las condiciones necesarias para la aparición de especies complejas, y aunque no se profundiza en la geometría del ion Cd^{2+} ni en la teoría de campo cristalino, sí se establece una relación coherente entre acidez y estabilidad del complejo.

Por su parte, respecto del sistema $\text{Ag}_2\text{C}_2\text{O}_4$ / etilendiamina (en), plantearon correctamente los dos equilibrios de protonación del ligando bidentado y sus complejos con $\log \beta$ de 4,70 y 7,70 para los iones $[\text{Ag}(\text{en})]^+$ y $[\text{Ag}(\text{en})_2]^+$. La descripción mostró un manejo coherente de las constantes de acidez del ácido oxálico, el balance de material y el uso de los factores como el FLM y FHA. En el análisis se señala: *"la formación del complejo está determinada por el pH; solo en medio básico se dispone del ligando no protonado, por eso hay un punto crítico entre pH 7,8 y 8,1 donde aparece la máxima concentración de $[\text{Ag}(\text{en})_2]^{++}$ ".* Este razonamiento hace evidente que los profesores en formación no solo comprendieron los equilibrios implicados, sino que deducen de forma cuantitativa cómo varían las especies en función del pH. Si bien no menciona explícitamente la coordinación lineal característica de los complejos de plata, la articulación matemática y conceptual respalda un discurso químico que va avanzando.

En el sistema ZnC_2O_4 / NH_3 , el ion Zn^{2+} se deja coordinar con cuatro moléculas de amoníaco ($\log \beta_4 = 9,46$) y la coexistencia con el oxalato implicaban integrar equilibrios de formación simultánea. En este caso, los estudiantes describieron correctamente el modelo que incluía la disolución del oxalato de zinc, la especiación del NH_3 (a partir de su equilibrio con el ion NH_4^+) y la formación de los complejos $[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$. En una de las observaciones más significativas, se lee: *"la base conjugada NH_3 predomina a pH básico, por eso en pH ácido hay poco complejo, y la función puntero muestra cómo crece la fracción de $[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ entre pH 8 y 10".* Este tipo de razonamiento, basado en la interpretación de gráficas, la deducción matemática y la aplicación de principios de equilibrio, demuestra una capacidad de predicción y análisis consolidada, aunque aún no se profundice en la geometría tetraédrica de los complejos del ion Zn^{2+} ni en su justificación desde la repulsión estérica o la densidad electrónica del ligando.

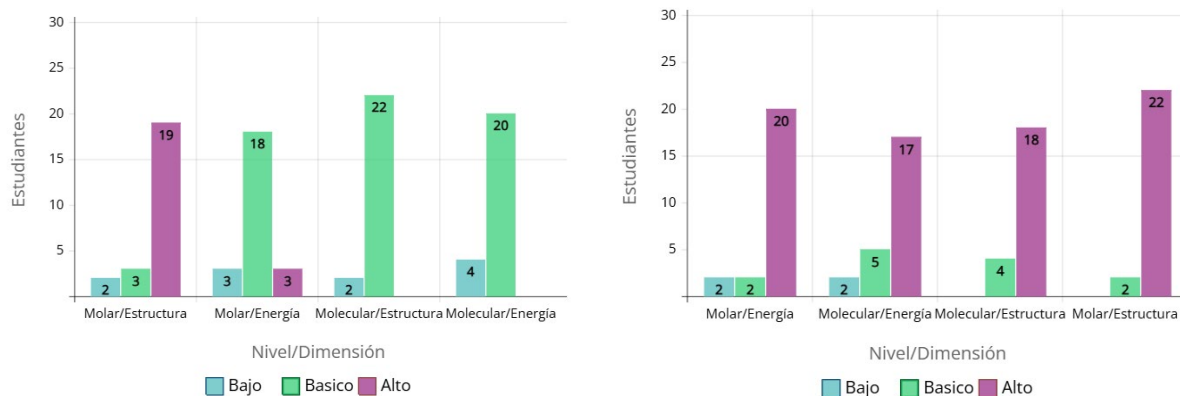
En conjunto, la comparación entre ambos grupos muestra que, si bien todos los profesores en formación lograron desarrollar modelos matemáticos funcionales que representaban con precisión la evolución de las especies químicas en función del pH, las diferencias radicaron en la profundidad del análisis y en el grado de articulación entre las representaciones matemáticas, gráficas y teóricas. El grupo de SI-II mostró un dominio intermedio del

discurso químico: se reconocieron patrones gráficos y relaciones básicas entre el pH y la formación de complejos, pero sin una integración de conceptos estructurales o energéticos. En cambio, el grupo de MAQ-I alcanzó explicaciones más detalladas, apoyadas en la especiación ácido-base y la estabilidad relativa de los complejos. Esto reafirma que el desarrollo del discurso químico no solo depende de la ejecución de herramientas como Excel, sino de la mediación conceptual que permita movilizar modelos explicativos desde lo observable hasta lo teóricamente inferido (Gilbert, 2006; Jensen, 1998). La modelación, entonces, se consolidó como un recurso didáctico eficaz para visualizar y explicar los sistemas de equilibrio complejos, favo-

reciendo una transición del pensamiento descriptivo al argumentativo, en especial cuando se acompañó de análisis estructurado, fundamentación teórica y lectura crítica de los resultados.

Informes de laboratorio

El informe de laboratorio permitió conocer cómo los estudiantes movilizan el discurso químico en situaciones experimentales. Por medio de la observación de reacciones de formación y disociación de complejos con los iones Cu^{2+} , Zn^{2+} y Ag^{+} , así como la influencia del pH y ligandos, los profesores en formación debían describir, explicar y justificar fenómenos observados a partir de conceptos y relaciones químicas.



Gráfica 3. Desempeños en las relaciones entre los niveles y dimensiones en los informes de laboratorio a) para el grupo de SI-II y b) para el grupo de MAQ-II

En la gráfica 3a, se observa que en el grupo de SI-II, en el nivel molar en la dimensión energía se ubicaron 18 profesores en formación en el nivel básico; en

el nivel molecular en la dimensión estructura, 22; en el nivel molecular en la dimensión energía 20 y en el nivel molar en la dimensión estructura 19 profesores en

formación se ubican en un nivel alto. En contraste, como se observa en la gráfica 3b, el grupo de MAQ-I presentó una tendencia según la cual 22 profesores en formación alcanzaron el nivel alto en molar/estructura, 17 en molecular/energía, 20 lo hicieron en molar/energía y 20 en molecular/estructura.

En cuanto al nivel molar y a la dimensión estructura, ambos grupos lograron identificar correctamente los cambios observables en color, precipitación o solubilidad durante la formación de complejos. Sin embargo, las respuestas del grupo MAQ-I se caracterizaron por explicaciones más argumentativas y fundamentadas. En un informe se explica que *"al añadir HCl concentrado a una solución de CuSO_4 , el color azul característico del ion $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ cambia a verde intenso por la formación del complejo $[\text{CuCl}_4]^{2-}$ "*. Esta explicación no solo describe el fenómeno, sino que reconoce la sustitución de ligandos y su relación con la alteración del entorno electrónico del ion metálico. En cambio, en el grupo de SI-II, aunque se reporta el cambio de color al adicionar NH_3 , las explicaciones tienden a ser más descriptivas: *"se forma un complejo con amoníaco y cambia el color"*, sin especificar la geometría o los ligandos involucrados, lo que sugiere un nivel menos desarrollado del discurso químico.

Respecto al nivel molar y a la dimensión energía, las diferencias entre los grupos se acentúan. En el grupo de MAQ-I, los profesores en formación demostraron que com-

prenden que la adición de ácido o base altera la disponibilidad del ligando y por tanto desplaza el equilibrio químico. Una afirmación destacada fue: *"la adición de HNO_3 genera la protonación del ligando amoníaco, rompiendo el complejo y desplazando el equilibrio hacia la izquierda"*. Esta explicación moviliza el principio de Le Châtelier y articula con claridad el vínculo entre el entorno ácido-base y la estabilidad de los complejos. Por su parte, en el grupo de SI-II, si bien se identificaron cambios en el sistema, las explicaciones no siempre abordaron los mecanismos energéticos involucrados. En varios informes, se observó que las reacciones se reportan como hechos observados *"el precipitado se disolvió con NH_3 "* sin un análisis de por qué ocurre dicho cambio ni qué implicaciones tiene en términos de energía de estabilidad.

En el nivel molecular y la dimensión estructura, el grupo de MAQ-I mostró una mejor capacidad para formular las reacciones de formación de complejos y discutir la estructura de los productos. En varios informes se presentan correctamente ecuaciones tales como $\text{Cu}^{2+} + 4\text{NH}_3 \rightarrow [\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$, y se sustenta esta representación con afirmaciones como *"la formación del complejo cambia la geometría alrededor del Cu^{2+} , estabilizando el sistema"*. Aunque no siempre se menciona explícitamente la geometría tetraédrica u octaédrica, sí se observa coherencia al indicar que el tipo de ligando y su número de coordinación afectan la configuración del

complejo. En cambio, en el grupo de SI-II, aunque algunos informes incluyen ecuaciones químicas, estas no van acompañadas de una discusión sobre geometría, lo que sugiere una comprensión más superficial.

Finalmente, en el nivel molecular en la dimensión energía, los informes del grupo de MAQ-I presentan un discurso más elaborado, con vínculos entre constantes de formación, condiciones del medio y estabilidad del complejo. En un caso se indica que *“el valor obtenido de K_{diss} confirma la estabilidad relativa del complejo y su sensibilidad frente a la concentración de ligando libre y la presencia de Cl^- ”*. Esta afirmación no solo interpreta un valor numérico, sino que lo contextualiza en función de los principios termodinámicos y de competencia entre ligandos. Este tipo de argumentación es indicativa de un discurso químico más desarrollado. En el grupo de SI-II, aunque se realizaron algunos cálculos de constantes, las respuestas se limitaron a reportar el valor numérico sin reflexionar sobre su significado ni sobre los factores estructurales o energéticos que lo afectan.

En síntesis, el análisis de los informes de laboratorio revela que el grupo de MAQ-I ha desarrollado un discurso químico más argumentativo, integrado y explicativo, mientras que el grupo de SI-II se mantiene en un nivel descriptivo con limitadas conexiones teóricas. Esta diferencia puede atribuirse tanto al grado de formación como a la acumulación de experiencias didácticas que permiten reconocer patrones, aplicar principios y

construir explicaciones químicas. Tal como lo señala Gilbert (2006), el desarrollo del discurso químico requiere entornos en los cuales los profesores en formación puedan conectar lo que observan, lo que simbolizan y lo que explican desde modelos científicos. La práctica experimental, cuando se acompaña de reflexión estructurada, se convierte entonces en un espacio privilegiado para esa construcción.

Conclusiones

A partir del análisis de los resultados obtenidos, fue posible establecer una caracterización del discurso químico de los profesores de Química en formación frente al abordaje del equilibrio de formación de complejos en relación con el efecto del pH y la solubilidad. Las conclusiones que se presentan a continuación buscan responder a la pregunta de investigación planteada, en coherencia con los hallazgos expuestos y reconociendo los límites del estudio en función de su enfoque cualitativo y formativo. De esta manera, se puede afirmar que el discurso químico de los profesores en formación se caracteriza por:

- » Un mayor dominio en el nivel molar: los profesores en formación describen con precisión los fenómenos observables (cambios de color, formación de complejos y solubilizar los precipitados), identifican correctamente las especies químicas implicadas y reconocen patrones experimentales básicos.

» Una comprensión parcial del nivel molecular: aunque se reconocen algunas estructuras de coordinación, el uso de modelos submicroscópicos para explicar la estabilidad de complejos y su comportamiento frente al pH es limitado, especialmente en los participantes de SI-II. En cambio, los MAQ-I logran establecer con mayor claridad relaciones entre la naturaleza del ligando, la geometría del complejo y su estabilidad.

» En la dimensión estructural, se observaron avances en el uso correcto del lenguaje químico y en la representación de reacciones, aunque la justificación del tipo de complejo y su geometría aún requiere desarrollo para representar la organización tridimensional de los complejos y relacionarla con sus propiedades fisicoquímicas.

» En la dimensión energía los estudiantes lograron explicar el efecto del pH sobre la formación de complejos y la solubilidad de compuestos poco solubles, especialmente mediante el principio de Le Châtelier. Sin embargo, solo el grupo de MAQ-I logró articular con profundidad conceptos como constantes de formación, acidez del medio y fortaleza de los ligandos. Esta dimensión es la menos desarrollada en ambos grupos.

» Se encontró un uso progresivo del discurso: los estudiantes pasaron de una descripción observacional a un discurso más argumentativo y explicativo. La integración de teoría, modelación

y laboratorio permitió construir conexiones entre niveles de representación y mejorar la comprensión de sistemas complejos, tal como lo plantean Gilbert (2006) y Biggs (2003).

En este sentido, se concluye que el discurso químico de los profesores en formación se encuentra en transición, va desde un enfoque centrado en la descripción de lo observable hacia una comprensión integrada que combina niveles y dimensiones del conocimiento químico. Su desarrollo no es espontáneo, sino que requiere ser guiado a través de experiencias didácticas articuladas, explícitas y progresivas. Como señalan Mortimer y Scott (2003), es en la interacción entre lenguaje, experiencia y modelación donde el conocimiento científico se transforma en comprensión. Esto reafirma la propuesta de Jensen (1998) sobre la lógica estructural de la química y su enseñanza: comprender un fenómeno químico implica movilizar simultáneamente lo que se ve, lo que se representa y lo que se infiere. Solo así el discurso químico se convierte en una herramienta de explicación, argumentación y enseñanza.

Referencias

- Biggs, J. (2003). *Teaching for quality learning at university* (2.a ed.). Society for Research into Higher Education (SRHE) y Open University Press.
- Bodner, G. M. y Domin, D. S. (2000). Modelos mentales: el papel de las repre-

- sentaciones en la resolución de problemas en química. *University Chemistry Education*, 4(1), 24–30.
- Cotton, F. A., y Wilkinson, G. (1999). *Química inorgánica avanzada* (6.ª ed.). John Wiley & Sons.
- Gilbert, J. K. (2006). *Educación científica: enseñanza y aprendizaje basados en modelos*. Routledge.
- Housecroft, C. E., y Sharpe, A. G. (2018). *Química inorgánica* (5.ª ed.). Pearson Education.
- Jensen, W. (1998). Does Chemistry have a logical structure? *Journal of Chemical Education*, 75(6), 680.
- Masterton, W. L. y Hurley, C. N. (2020). *Química: principios y reacciones* (8.ª ed.). Cengage Lea.
- Mortimer, E. F. y Scott, P. H. (2003). *La construcción de significados en las aulas de ciencias de secundaria*. McGraw-Hill.