

Representaciones gráficas de sistemas multicomponentes y multirreaccionantes: el Método de Especies y Equilibrios Generalizados

Alberto Rojas-Hernández

Introducción

Al celebrar el 50 aniversario del inicio del otorgamiento del Premio Andrés Manuel del Río, durante el XLIX Congreso Mexicano de Química y el XXXI-II Congreso Nacional de Educación Química, se le pidió al doctor Jorge Ibáñez Cornejo que organizara un simposio en donde reuniera a algunos de los premiados en docencia, para que cada uno de ellos hablara de algunos de sus merecimientos para recibir tal distinción. Siempre he pensado que mi principal contribución a la enseñanza de la Química ha sido la forma como presento el estudio y la aplicación de diferentes representaciones gráficas de sistemas multicomponentes y multirreaccionantes y, en particular, el que llamo Método de Especies y Equilibrios Generalizados. En este trabajo haré un resumen de mi presentación durante el mencionado simposio, tratando de establecer cómo es que fui construyendo el método y de resaltar sus peculiaridades y fortalezas para la enseñanza de la Química Analítica.

Formación inicial en la UNAM como autodidacta: el CCH-Vallejo y llegada a la ENEP-Cuautitlán

Después de aprobar el examen de ingreso a la UNAM y haber elegido al Colegio de Ciencias y Humanidades —Plantel Vallejo (CCH-Vallejo)— para estudiar el bachillerato, en 1972 inicio mi formación como autodidacta, que era en ese tiempo el objetivo principal de esa institución. También se me dio una visión activa en cuanto a la enseñanza y aprendizaje del método experimental, que era uno de sus objetivos particulares [1]. Sin saber si la formación recibida en el CCH-Vallejo había logrado su cometido en mí, en marzo de 1975 llego a la Escuela Nacional de Estudios Profesionales de Cuautitlán (ENEP-Cuautitlán, que abrió sus puertas un año antes) a estudiar la carrera de Químico. Durante el primer año

y por diferentes experiencias de aprendizaje me di cuenta de que sí podía considerarme un autodidacta con una idea aceptable de la metodología experimental. Y dos cursos que me ayudaron a reforzar esta formación, en gran medida, fueron los de Laboratorio de Ciencia Básica I y II. Tuve la fortuna en ese momento de que la Q. Gloria Soto Hernández fue asignada como maestra a mi grupo, y Gloria siempre ha sido una maestra comprometida con el aprendizaje de sus alumnos. En esas asignaturas, aun sin que yo comprendiera del todo los aspectos más generales de la metodología experimental aplicada a la resolución de problemas, Gloria se empeñó en enseñarnos la importancia de estos aspectos. Años después ella me ayudaría a aprender, ya como maestro, cómo puede darse la conducción de un grupo hacia el aprendizaje de la metodología experimental en química. También más adelante comprendería la importancia de las representaciones gráficas en el diseño e interpretación de experimentos en Química Analítica.

Formación en Química Analítica, como profesional y como profesor en la FES-Cuautitlán

La iniciación en la Química Analítica de Charlot
Después del curso de Análisis I, que fuera informativo y tradicional, durante el segundo año de la carrera (en 1976) y en el curso de Análisis II, aprendí la metodología básica de la Química Analítica concebida por el Prof. Gaston Charlot —en Francia— para la enseñanza de los equilibrios químicos redox, ácido-base de Brønsted y de complejos (formación de compuestos de coordinación), como procesos de intercambio de una partícula, así como su aplicación a sistemas reales en donde se utiliza el análisis químico. En ese curso mi aprendizaje fue bastante mecánico, pero aun así me pareció muy importante una de las herramientas básicas del método de

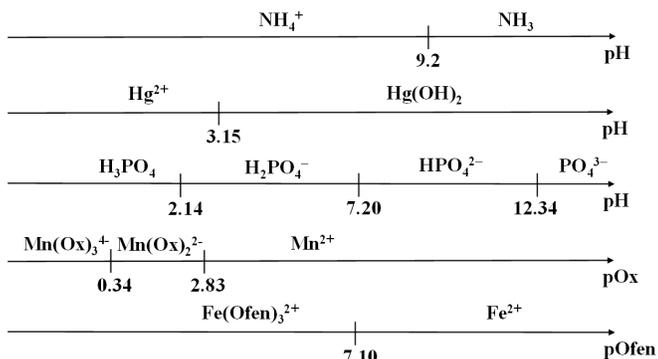


Figura 1. DZP lineales en sistemas, considerando el intercambio de una sola partícula.

$\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$, $\text{pOx} = -\log[\text{oxalato}]$ y $\text{pOfen} = -\log[1,10\text{-fenantrolina}]$. Datos tomados del libro de Ringbom [1] para los dos diagramas de la parte superior y de Rojas-Hernández y col. [2] para los demás diagramas.

Charlot, que es el diagrama de zonas de predominio (DZP). Ejemplos de esos diagramas se muestran en la Figura 1. Algunas de las aportaciones más importantes a mi formación en Química Analítica me las dio, y comenzó desde ese entonces, la maestra Rosamar (Dra. Margarita Rosa Gómez Moliné). Aunque en ese tiempo no era común en la enseñanza del método de Charlot presentar los DZP a través de los diagramas de distribución (DD), más adelante entendería su relación (Figura 2). Asimismo comprendería todas las implicaciones del algoritmo de Charlot para construir el DZP sin tener que hacer el DD; a través de la construcción de la escala de predicción de reacciones (EPredReac), lo que intuitivamente explica por qué el anfolito MnOx no puede predominar en el sistema de Mn(II)-oxalato (Figura 3).

La consolidación en la Química Analítica de Charlot

Otro curso que marcaría profundamente mi formación como químico y como profesor fue el de Análisis IV que se nos impartió en 1977, durante el tercer año de la carrera, bajo la tutela del Dr. Helmut Pitsch Kluth. En ese curso fue en el que Helmut nos hizo comprender y apreciar, desde el punto de vista conceptual, el enfoque de Química Analítica del Prof. Gaston Charlot, lo que era de suma importancia porque en ese curso de Análisis IV se enseñaba lo que en Francia se conoce como intercambio de dos partículas. Los aspectos más sutiles de la metodología de Charlot fueron presentados por Helmut en ese curso y me maravilló la capacidad de abstracción y generalización del método para plantear y resolver problemas. Los modelos que se

crean desde ese enfoque tienen una gran capacidad de predicción e interpretación de los procesos químicos que se pueden presentar en el laboratorio, en las plantas industriales y en la naturaleza.

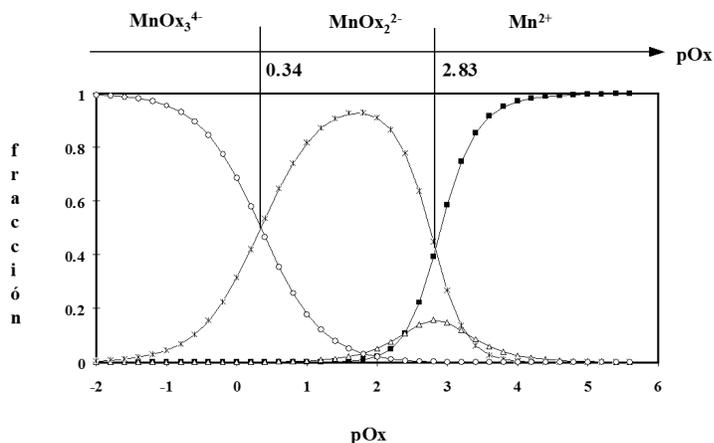


Figura 2. Relación entre el DZP y el DD en el sistema de dos componentes Mn(II)-oxalato (Ox). La especie MnOx no puede predominar, aunque se encuentra presente en el sistema hasta cerca de un 15% a $\text{pOx} = 2.83$.

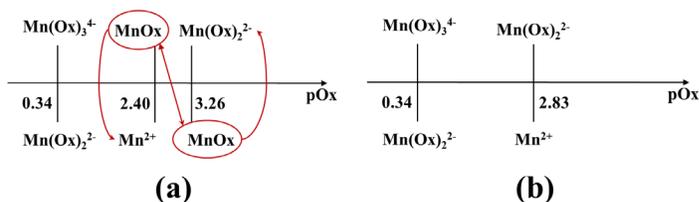


Figura 3. EPredReac para construir el DZP del sistema Mn(II)-Ox. a) Escala inicial que muestra que el anfolito MnOx no puede predominar en el sistema, por lo que se procede a simplificar la escala. b) Primera escala simplificada, que muestra que el anfolito MnOx_2^{2-} sí puede predominar. A partir de esta escala simplificada se puede construir entonces el DZP que se muestra en la parte superior de la Figura 2.

Además del uso exhaustivo de los DZP lineales, en el curso de Análisis IV se aprendía la construcción y aplicación de diagramas de Pourbaix, una representación gráfica equivalente al DZP para procesos redox, pero en dos dimensiones. Ejemplos de esta representación se muestran en la Figura 4.

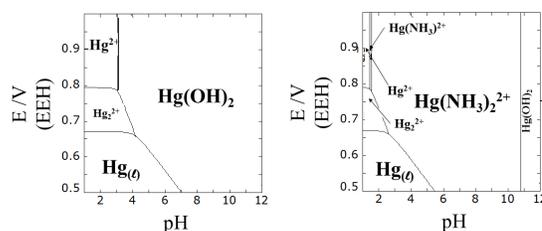


Figura 4. Diagramas tipo Pourbaix para diferentes sistemas a la concentración total de Hg 1×10^{-4} M. a) Diagrama de Pourbaix para el sistema Hg(II)/Hg(I)/Hg(0)/H₂O/e⁻. b) Diagrama tipo Pourbaix para el sistema Hg(II)/Hg(I)/Hg(0)/NH₃/H₂O/e⁻ a $\text{pNH}_3 = 1.0$. Datos tomados de la base de datos HYDRA del programa MEDUSA [3].

Carrera académica en la FES-Cuautitlán de la UNAM

Después del curso de Análisis IV Helmut nos propuso, a Nacho (mi amigo y compañero de generación en la ENEP-Cuautitlán, Dr. Ignacio González Martínez) y a mí, trabajar como ayudantes de profesor, con lo que dio inicio mi carrera académica. Desde 1978 se me asignó como actividad docente la enseñanza de laboratorios del curso de Análisis IV, que siempre me pareció el curso más interesante y bello del método de Charlot. Desde entonces intenté enseñar el método del profesor Gaston Charlot para el estudio de los equilibrios en disolución, tratando de explicar cada vez mejor los conceptos y sus posibilidades de aplicación, a los estudiantes de nivel licenciatura.

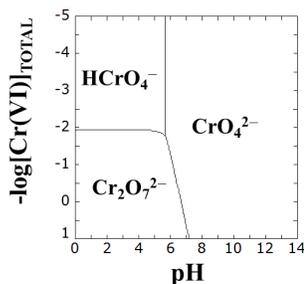


Figura 5. DZP de las especies de Cr(VI) en disolución acuosa. Datos tomados del programa MEDUSA [3].

Aproximadamente en 1980 (año en que la ENEP-Cuautitlán se transforma en Facultad de Estudios Superiores de Cuautitlán (FES-Cuautitlán) por la fundación del Posgrado en Microbiología), motivado por el interés de algunos de nosotros de aprender más elementos para manejar mejor nuestra enseñanza, Helmut impartió un curso de actualización a los profesores de la Sección de Química Analítica que enseñábamos teoría o laboratorio de Análisis IV. En ese curso nos presentó el método de Andres Ringbom para los equilibrios de complejación. Así, aprendí el concepto de constante condicional y la posibilidad de que en un sistema se presenten especies polinucleares (dímeros, trímeros, tetrámeros o, en general, oligómeros) [4]. Adicionalmente, Helmut nos enseñó a construir un diagrama que resulta útil para el estudio de especies polinucleares. Es el DZP que se muestra en la Figura 5.

El hecho de poder definir equilibrios químicos descritos por conjuntos de especies a los que se les

puede asociar una ley de acción de masas (constantes condicionales) que en ciertas condiciones impuestas se pueden manejar como si fueran constantes de equilibrio simples me pareció fascinante, al igual que el diagrama de las especies del Cr(VI) en disolución acuosa.

A partir de ese curso, los profesores que enseñábamos Análisis IV en la FES-Cuautitlán, que hasta ese momento habíamos seguido casi tal cual la presentación del libro de Charlot [5], decidimos incluir algunos conceptos del libro de Ringbom y mostrar el cálculo de constantes condicionales, sin abandonar la enseñanza del método de Charlot.

Sin embargo, eso no me dejó del todo satisfecho después de uno o dos cursos. El parecido del DZP de las especies del Cr(VI) en disolución acuosa con los diagramas de Pourbaix me hizo concebir la idea de que, así como era posible construir DZP para sistemas ácido-base, de complejación y redox en intercambio de una partícula, también podrían construirse diagramas como los de Pourbaix (DZP bidimensionales) para sistemas en donde no hay intercambio de electrones, aunque no se formaran especies polinucleares. Pero ¿cómo hacerlo?

En 1982 se me asignó también la enseñanza de un curso de teoría de Análisis IV. ¡Por fin podría intentar construir los DZP que intuía que se podían obtener! Sin embargo, pasaron dos largos años antes de que encontrara el algoritmo que permitiría construir dichas representaciones gráficas. Cuando intentaba hacerlo, no sabía cómo seguir. Lo más lejos que había llegado en esos dos años era saber cuál sería el espacio de la representación gráfica: así como en el intercambio de una partícula el espacio de representación es la escala de pL, en el intercambio de dos partículas L y H⁺ con amortiguamiento en pH, el espacio de la representación gráfica debería ser definido por los ejes pL/pH.

Una feliz idea concreta años de esfuerzo

Una tarde en casa de mi novia, como a las 18 horas, me encontraba muy distraído pensando en mi clase del otro día. Quería presentar la construcción de DZP para luego enseñar a usarlos. Mi novia, Rebeca, me preguntó por qué estaba tan distraído. Entonces intenté explicarle lo que quería hacer en mi curso

y, para hacerlo, le comenté mis ideas sobre los DZP bidimensionales, en el espacio pL'/pH. Como se interesó (es QFB), continué explicándole: “Lo que no sé es como seguir hacia la construcción, ¿qué debo graficar en ese espacio?”. Tomé como ejemplo el diagrama de Pourbaix y le comenté que en ese diagrama se usan equilibrios sucesivos de intercambio de electrones, “y de cada uno de ellos se grafica un ‘potencial aparente’, dependiente del pH...”.

¡Entonces se me ocurrió la idea! Lo que debía hacer, por analogía con el diagrama de Pourbaix, era definir equilibrios “primados” como los que definía Ringbom, pero tenía que definir varios de ellos, y tenían que ser equilibrios sucesivos de intercambio de L' con su “constante condicional”. Lo que graficaría entonces serían los logaritmos de esas constantes condicionales, tal como se hacía con el diagrama lineal de pL en el método de Charlot.

Esa noche estuve trabajando en mi casa en la construcción de mi primer DZP. Por la dinámica del curso que estaba dando, en particular, tenía que utilizar el intercambio de protones en EDTA bajo condiciones de amortiguamiento en el ion Ba^{2+} . Ese DZP se muestra en la Figura 6.

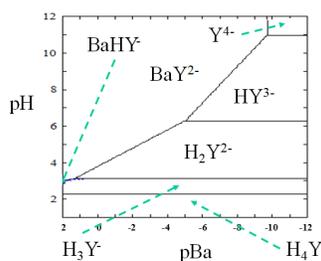


Figura 6. DZP de las especies de EDTA en disolución acuosa a concentración impuesta del ion Ba^{2+} . Datos tomados del libro de Ringbom [4].

Aunque el DZP de la Figura 6 no es de los más sencillos de construir, puede hacerse con facilidad si se domina el método de Charlot para la construcción de DZP en sistemas de dos componentes con el intercambio de una partícula. Es por eso que pude construirlo, aunque era la primera vez que hacía uno de esos DZP.

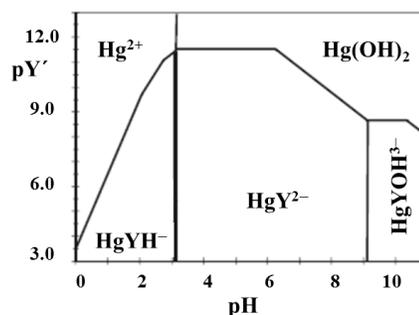
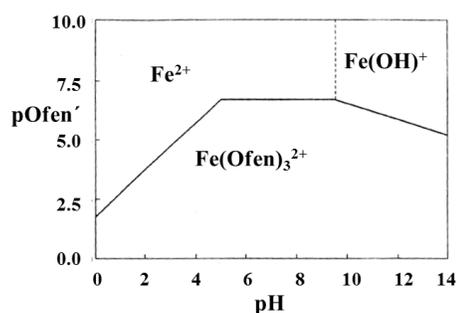
A partir de ese momento, en éste y en muchos cursos no parábamos de construir DZP para luego aplicarlos. Ejemplos de otros DZP, en donde el pH

se impone y se estudia el intercambio de partículas que son ligantes de iones de elementos metálicos se presentan en la Figura 7. Para que pudiera difundir en la Sección de Química Analítica de la FES-Cuautitlán lo que había encontrado, el Jefe de la Sección en ese momento, el doctor Michel Cassir Houry, me pidió que diera un seminario. Fue entonces que María Teresa Ramírez Silva (Tere) aprendiera el método y me ayudó a mecanografiar (con máquina de escribir) un libro para su uso en la FES-Cuautitlán, el cual se publicó en 1991, con el financiamiento de un proyecto del doctor José Luis Jurado Baizaval [9].

Formación de posgrado en Química Analítica y arribo a la investigación científica

El Método de Especies y Equilibrios Generalizados

Como yo no había completado mi formación académica hacia el posgrado, en 1982 ya me había inscrito a la Maestría en Ciencias (orientación en Química Analítica) en la Facultad de Química de la UNAM. Así, el método crecía mientras mi conocimiento y experiencia académica también crecían. En 1988 terminé mis estudios de maestría. Los profesores que más complementaron mi formación en Química Analítica en esa institución fueron el M. en C. Santiago Capella Vizcaíno y el doctor Alain Quéré Thorent. Tardé mucho tiempo en recibirme porque no quería dejar de dar clases en la FES-Cuautitlán.



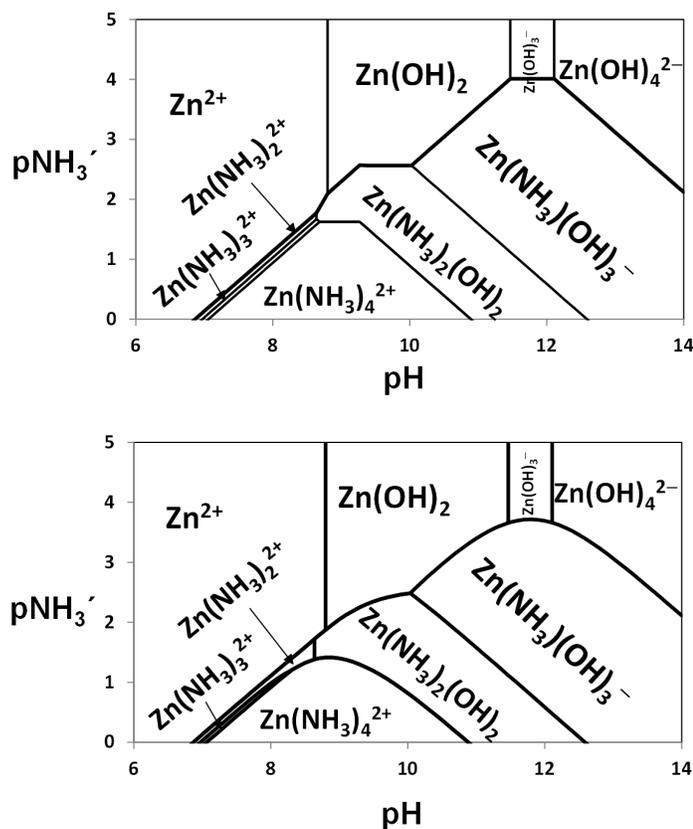


Figura 7. Diagramas de zonas de predominio bidimensionales para diferentes sistemas. a) Fe(II)-1,10-fenantrolina- H_2O . Tomado de Trejo y col. [6]. b) Hg(II)-EDTA- H_2O donde Y^{4-} representa la base etiléndiaminotetraacetato. Tomado de Juárez-Gómez y col. [7]. c) Zn(II)-amoníaco- H_2O con el método aproximado (ver texto). d) Zn(II)-amoníaco- H_2O con el método formal (ver texto). Tomado de Rojas-Hernández [8].

Hacia 1984 Nacho regresa a México, después de terminar su formación doctoral con el doctor Bernard Trémillon, y comenzamos a colaborar académicamente. Le mostré entonces los DZP que podía construir con el método que había ideado. Escribimos entonces un artículo de investigación, que por iniciativa de Nacho enviamos a la revista *Analytica Chimica Acta*, pues se había dado cuenta del potencial del método para su aplicación en la investigación científica. El mencionado artículo fue aceptado para publicación [10], con el invaluable apoyo por sus recomendaciones, de uno de los editores de la revista: Harry L. Pardue. Es así como un método para estudiar equilibrios en disolución, ideado y diseñado para enseñar Química Analítica, hace su aparición en el mundo de la investigación científica.

De la colaboración con Nacho y, en particular, de DZPs como el de la Figura 7a el doctor Yunny Meas Vong me propone que ingrese al Área de Electroquímica de la UAM-Iztapalapa (de la cual era jefe), a

la que finalmente ingreso en mayo de 1986 por las gestiones del entonces jefe del Departamento de Química, doctor José Luis Gázquez Mateos. También en esos años me di cuenta de que los equilibrios “primados” tipo Ringbom, que usaba mi método de construcción de DZP, era mucho más que un simple algoritmo. Las especies “primadas” que se tienen que definir en el método son verdaderamente especies generalizadas y los equilibrios químicos que las relacionan también son equilibrios generalizados, porque sus constantes condicionales son constantes bajo los amortiguamientos adecuados y siguen una ley de acción de masas. Fue así que en 1991 Nacho aceptó dirigirme una tesis de doctorado con ese tema en la UAM-Iztapalapa.

En los años siguientes a 1991 trabajé en la escritura de artículos, que fueron producto de mi tesis de doctorado [2, 10-17], con la inapreciable colaboración de Tere, Nacho, Jorge (Ibáñez Cornejo) y María Elena Páez Hernández; lo que formalizó el trabajo que desde 1980 había desarrollado como profesor en la FES-Cuautitlán. La tesis presenta la aplicación del método en sistemas con un solo amortiguamiento, amortiguamiento múltiple, formación de fases condensadas, extracción líquido-líquido y sistemas redox, considerando la formación de especies ternarias o cuaternarias y polinucleares. La defensa de mi trabajo de tesis de doctorado se realizó en 1995. Algunas de las representaciones gráficas de sistemas multicomponentes y multirreaccionantes que pueden lograrse a través del Método de Especies y Equilibrios Generalizados se presentan en la Figura 8.

También nos dimos tiempo en ese periodo para concursar con un texto de Química Analítica dirigido a la enseñanza, gracias a Gabriel Trejo Córdova; el texto resultó ganador y se publicó en la UAM-Iztapalapa en 1993 [18].

Impacto del Método de Especies y Equilibrios Generalizados

En docencia

Desde la propuesta del método se ha logrado su enseñanza en diferentes instituciones educativas para

le enseñanza de los equilibrios en disolución, tales como el Departamento de Química de la UAM-Iztapalapa, el Departamento de Ciencias Químicas de la FES-Cuautitlán y el Área Académica de Química de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Así, muchos estudiantes de Química de diferentes carreras y posgrados han aprendido los beneficios de este método, no sólo para la construcción de las representaciones gráficas, sino para su aplicación a la resolución de problemas en varios campos.

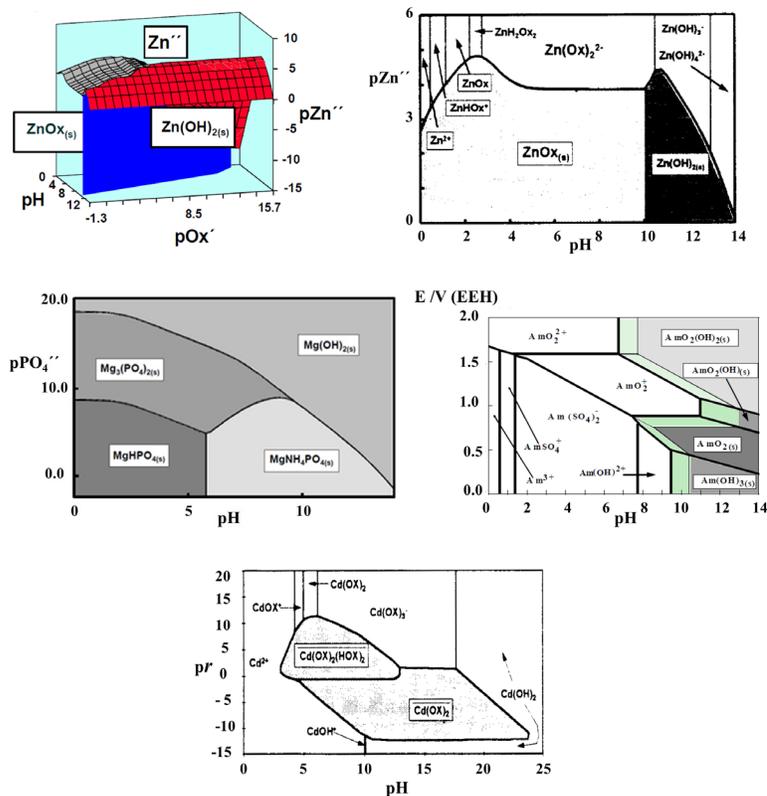


Figura 8. Diferentes representaciones gráficas en sistemas multicomponentes y multirreaccionantes. a) Diagrama de Existencia-Predominio del sistema Zn(II)-Ox-H₂O. b) Corte del diagrama mostrado en la Figura 8a, para pOx' = 1.0. c) Corte del Diagrama de Fases Condensadas para la especie generalizada insoluble de Mg²⁺(s) en el espacio pPO₄'/pH a pNH₃' = -0.3. d) Corte del Diagrama Tipo Pourbaix para el americio en el espacio E/ pH a pSO₄' = 0.523. Las líneas gruesas representan -logC*Am'' = 6.0, en tanto que las líneas delgadas representan -logC*Am'' = 8.0. e) DZP de las especies de cadmio en el espacio pr = /pH a p*OX' = p*oxina' = 1.0. [8]

Otra forma de medir el impacto logrado es que el libro de texto publicado por la UAM-Iztapalapa, que ha sido usado en las instituciones antes mencionadas, agotó su tiraje de mil ejemplares hace algunos años. Una distinción especial ha recibido nuestra publicación del *Journal of Chemical Education* [2] al ser citada por dos libros de texto. Uno de enseñanza de la Química Analítica [19] y el otro de enseñanza de la Química Inorgánica [20].

En investigación

Uno de los aspectos más interesantes del impacto del Método de Especies y Equilibrios Generalizados es la cantidad de citas que los trabajos tienen en artículos publicados en revistas científicas indizadas a nivel internacional. El trabajo del *Journal of Chemical Education* [2] tiene hasta ahora del orden de 10 citas (quitando las autocitas) en trabajos de investigación, en tanto que las referencias [10-17] tienen ya del orden de 60 citas.

Conclusión

El estudio de los equilibrios químicos en disolución acuosa en sistemas multicomponentes y multirreaccionantes es un tema importante de la termodinámica química y sus representaciones gráficas pueden llevar a una mejor comprensión del tema, sobre todo cuando se busca aplicarlo para resolver un problema en particular.

Los DD son las representaciones más típicas, pues reúnen información de las cantidades o concentraciones de equilibrio de muchas especies del sistema.

Como los DZP representan sólo las especies que se encuentran en mayor cantidad o concentración en el sistema, en principio, son más fáciles de interpretar y aplicar, aunque mediante algunas aproximaciones.

Si bien hay varios algoritmos y programas para construir representaciones gráficas de este tipo de sistemas, el Método de Especies y Equilibrios Generalizados tiene algunas características que lo distinguen, tales como:

1. Ha desarrollado dos algoritmos que se relacionan con la definición de las especies generalizadas.

Algoritmo aproximado. Uno de ellos es el aproximado, que define las especies generalizadas como las predominantes, con lo que los equilibrios generalizados se aproximan por un equilibrio representativo.

Algoritmo formal. El otro algoritmo es formal, y define las especies generalizadas como una suma de varias especies que guardan en común una estequiometría invariante en un conjunto de especies.

Entonces los equilibrios generalizados son procesos químicos en donde los reactivos y productos (especies generalizadas) son conjuntos de especies.

El algoritmo aproximado es más intuitivo, ideal para dar clase a nivel licenciatura; en tanto que el algoritmo formal es bastante abstracto, pero ideal para realizar cálculos porque es de fácil programación. Y para los fines que se persiguen con un DZP, ambos algoritmos dan resultados adecuados. Así, en los libros de enseñanza que tenemos [9, 18] se presenta y se usa el algoritmo aproximado, pero mi tesis de doctorado [8] y los artículos de investigación [10-17] presentan y aplican el algoritmo formal. Entonces, los diagramas de la Figura 7 (cuyas fronteras de predominio están formadas por segmentos lineales), con excepción de la 7d, fueron construidos con el algoritmo aproximado, en tanto que los de la Figura 8 (fronteras de predominio curvas) se obtuvieron con el algoritmo formal. Para ver qué tan grande puede ser la diferencia, se encuentran juntas la Figura 7c y la 7d, con lo que se puede constatar que para fines prácticos esta diferencia no es tan relevante.

2. A diferencia de otros métodos, el Método de Especies y Equilibrios Generalizados no sólo busca definir las fronteras de predominio en un DZP. Por su naturaleza y génesis, el corazón del método radica en las constantes condicionales de los equilibrios generalizados. Esto lo relaciona íntimamente con la termodinámica química conceptual. También hay que recordar que fue diseñado para generalizar los algoritmos del método de Charlot en la enseñanza de los equilibrios en disolución (que, estrictamente hablando, sólo es válido para sistemas de dos componentes). Es así que el Método de Especies y Equilibrios Generalizados tomó la definición básica de constantes condicionales pero, mediante la definición de varios equilibrios generalizados se extiende el método de estudio de Charlot para sistemas multicomponentes y multirreaccionantes.

Tal vez por las razones antes expuestas, la Sociedad Química de México tuvo a bien conferirme el Premio Andrés Manuel del Río 2011, en Docencia. En la Figura 9 muestro una foto de tan memorable suceso para mí, el cual agradezco profundamente.



Alberto Rojas Hernández, después de la conferencia que impartiera y de la ceremonia en que se le entregó el premio Andrés Manuel del Río en Docencia. En la foto aparece con su esposa, Rebeca Olmos Rivera, 11 de septiembre de 2011, Juriquilla, Querétaro.

Referencias

- Rojas-Hernández, A.; Ramírez-Silva, M.T. *Educ. Quím.* 2012, 23, 136-140.
- Rojas-Hernández, A.; Ramírez, M.T.; González, I.; Ibanez, J. G. J. *Chem. Educ.* 1995, 72, 1099-1105.
- Puigdomenech, I. *Make Equilibrium Diagrams Using Sophisticated Algorithms* (MEDUSA), 2009, <https://www.kth.se/en/che/medusa/downloads-1.386254>. Visitado por última vez en diciembre de 2014.
- Ringbom, A. *Formación de complejos en Química Analítica*. Alhambra. Madrid. 1973.
- Charlot, G. *Curso de Química analítica general*, Tomo I. Toray-Mason. Madrid. 1967.
- Trejo, G.; Ramírez, M. T.; Rojas, A. *Los Diagramas de Zonas de Predominio aplicados al análisis químico*. UAM-Iztapalapa. México. 1993.
- Juarez-Gomez, J.; Perez-Garcia, F.; Ramirez-Silva, M. T.; Rojas-Hernandez, A.; Galan-Vidal, C. A.; Paez-Hernandez, M. E. *Talanta*. 2013, 114, 235-242.
- Rojas, A. *El Método de Especies y Equilibrios Generalizados: Teoría y Algoritmos de los Diagramas de Zonas de Predominio*. Tesis de doctorado. UAM-Iztapalapa. México. 1995. p. 272.
- Rojas, A.; Ramírez, M. T. *Equilibrio Químico en Medio Amortiguado*. FESC-UNAM. Cuautitlán Izcalli. 1991.
- Rojas, A.; González, I. *Anal. Chim. Acta.* 1986, 187, 279-285.
- Rojas-Hernández, A.; Ramírez, M. T.; González, I.; Ibanez, J. G. J. *Electrochem. Soc.* 1991, 138, 365-372.
- Rojas-Hernández, A.; Ramírez, M. T.; González, I.; Ibanez, J. G. *Anal. Chim. Acta.* 1991, 246, 435-442.
- Rojas-Hernández, A.; Ramírez, M. T.; González, I. *Anal. Chim. Acta.* 1992, 259, 95-104.
- Rojas-Hernández, A.; Ramírez, M. T.; González, I. *Anal. Chim. Acta.* 1993, 278, 321-333.
- Rojas-Hernández, A.; Ramírez, M. T.; González, I. *Anal. Chim. Acta.* 1993, 278, 335-347.
- Rojas-Hernández, A.; Ramírez, M. T.; González, I. *Química Analítica*. 1996, 15, [Suppl.1] S4-S8.
- Páez-Hernández, M. E.; Ramírez, M. T.; Rojas-Hernández, A. *Talanta*. 2000, 51, 107-121.
- Trejo, G.; Ramírez, M. T.; Rojas, A. *Los Diagramas de Zonas de Predominio Aplicados al Análisis Químico*. UAM-Iztapalapa. México, D. F. 1993.
- Harris, D. *Quantitative Chemical Analysis*. 6th. ed. Freeman. New York. 2003. Capítulo 13.
- Rayner-Canaham, G. *Descriptive Inorganic Chemistry*. 2nd. ed. Freeman. New York. 1998. Capítulo 19.