

# La investigación en Química Analítica en México en los albores del Siglo XXI: Una visión desde el Área de Química Analítica de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa

Alberto Rojas Hernández, María Teresa Ramírez Silva

Departamento de Química. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Av. San Rafael Atlixco # 186, México 09340, D. F. suemi918@xanum.uam.mx

**Resumen.** Hacia 1970 comienza en la UNAM la enseñanza formal de la química analítica del profesor Gaston Charlot, que fue llevada a la entonces ENEP-Cuautitlán por Margarita Rosa Gómez Moliné y Helmut Pitsch. Allí, alumnos de la generación 75-79 de licenciaturas del área química conocimos los desarrollos sistemáticos de la química de las disoluciones: diagramas de zonas de predominio y escalas de predicción de reacciones, entre otros, que nos maravillaban por su rigor y aplicación práctica. En la Sección de Química Analítica de la FES-Cuautitlán se decidió mantener la visión del profesor Charlot. Aprendimos a enseñarla y la hemos mantenido y extendido por sus bondades para la formación de conceptos y de métodos de resolución de problemas. Para muchos de nosotros fue el inicio de una carrera de investigación científica en química analítica.

**Palabras clave:** Química Analítica, Historia del Siglo XX.

**Abstract.** Around 1970, formal teaching of Professor Gaston Charlot's analytical chemistry began at the UNAM; specifically at the ENEP Cuautitlán campus. The two professors in charge were Margarita Rosa Gómez Moliné and Helmut Pitsch. There, students from the 1975-1979 generation who were majoring in Chemistry and other related fields learned about the systematic development of solution chemistry, predominance-zone diagrams, and reactions-prediction scales, among others; which scientific rigor and practical application amazed us. The Analytical Chemistry Section of FES-Cuautitlán decided to maintain Professor Charlot's vision. We learned to teach it and we have kept and spread it due to its valuable use in the formation of concepts and problem-solving methods. For many of us, it was the beginning of our careers in scientific investigation on Analytical Chemistry.

**Kew words:** Analytical Chemistry, XX Century History.

## Introducción

El análisis químico es practicado desde tiempos muy antiguos, ya que para poder utilizar alguna sustancia es conveniente saber de qué está hecha y cuánto tiene de algunos o de cada uno de sus constituyentes. Es por ello que se recomienda al lector interesado en la historia de la Química Analítica ir al libro de Szabadváry [1], en donde se narran aspectos relevantes de esa historia en el mundo. Por otra parte también es necesario mencionar el trabajo de Capella Vizcaíno [2] que relata su visión del desarrollo de la Química Analítica en México, en la segunda mitad del siglo XX. En el presente artículo se pretende dar una visión del desarrollo de la investigación en Química Analítica en nuestro país a finales del siglo XX y en los albores del siglo XXI, que pueda reflejarse cuantitativamente en productos tales como artículos de investigación en revistas con arbitraje, libros científicos y producción de nuevos conocimientos. Sin embargo, aunque se pretende recuperar algo de esta historia, debe entenderse que no se ha hecho una investigación científica sistemática y exhaustiva y que —en forma inevitable— la historia que aquí se cuenta es inseparable de la visión de sus narradores. Es por ello que la narración se centra en el desarrollo de la investigación en Química Analítica que proviene de la simiente establecida en México por el Profesor Gaston Charlot, pero fuera de la Facultad de Química de la UNAM.

## Del Análisis Químico a la Química Analítica

Los procedimientos de Análisis Químico en todo el mundo se compilan en manuales que los describen minuciosamente,

de manera que puedan ser reproducidos satisfactoriamente si se siguen al pie de la letra. Esta imperiosa necesidad para la estandarización de los procedimientos que permiten el control de calidad de productos y procesos llevó —ya a principios del siglo XX— a la falsa apreciación de que el Análisis Químico no es más que un área de servicio para otras ramas de la Química, tales como la Química Orgánica, la Química Inorgánica y la Fisicoquímica. Sin embargo, el desarrollo de nuevos procedimientos de Análisis Químico requiere de la aplicación de los fundamentos fisicoquímicos que determinan el cauce y la puesta a punto de esos procedimientos. Así, la Química Analítica reúne el cuerpo de conocimientos, técnicas y métodos que permiten la instrumentación y la interpretación de los procedimientos analíticos ya existentes y el desarrollo de los nuevos procedimientos.

Curiosamente en la actualidad se puede decir que la Química Analítica es posiblemente el área más interdisciplinaria de la Química, ya que los problemas de análisis químico generalmente proceden de otros campos, tales como la farmacia, la industria, la manufactura, la medicina y el control ambiental. En la figura 1 se presenta un esquema que describe todo lo que concierne directamente a la problemática inherente a la Química Analítica. Es un intento de transcribir a un esquema la idea que se encuentra en el libro de Laitinen y Harris [3]:

“El quehacer del moderno profesional de la Química Analítica se enfoca no a resolver el problema de una muestra, sino el problema que la muestra representa.”

De acuerdo al esquema de la figura 1 —desde nuestro punto de vista— la Química Analítica está constituida por cuatro áreas: el Análisis Químico, el Análisis de los

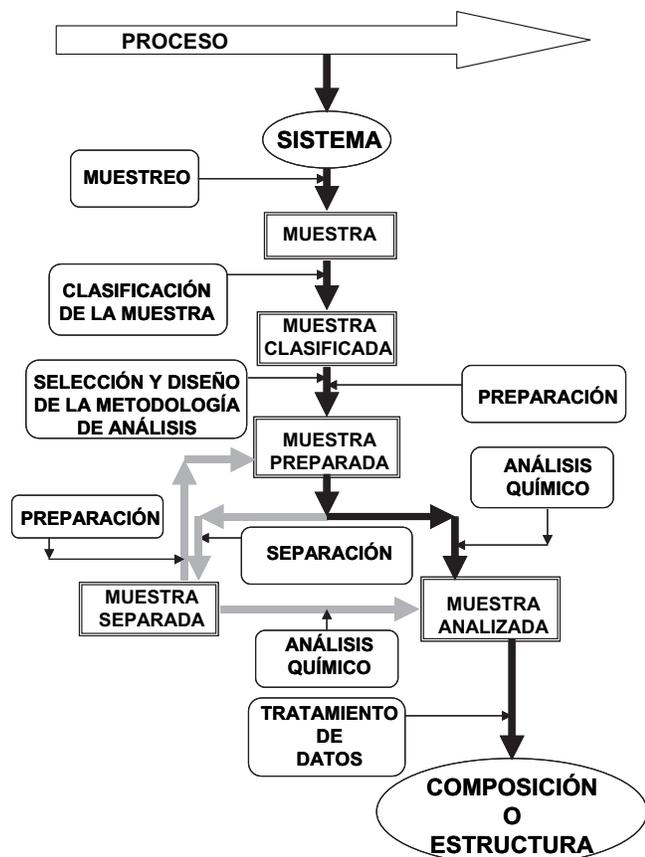


Fig. 1. Se tiene un problema de Análisis Químico de un sistema inmerso en un proceso. El esquema muestra las diferentes interacciones con el sistema y sus muestras mediante procedimientos que llevan a la solución del problema. Todo lo que se encuentra en el esquema concierne a la Química Analítica.

Procesos Físicoquímicos, el Análisis Instrumental y el Análisis Quimiométrico, en un enfoque contemporáneo. Las cuatro áreas deben tener igual importancia para el buen desarrollo de la Química Analítica.

El Análisis Químico se entiende como el conjunto de procedimientos que permiten la determinación de la composición química cualitativa, cuantitativa y estructural de un sistema. Durante mucho tiempo (prácticamente hasta el inicio del siglo XX) la Química Analítica se concebía solamente como el Análisis Químico. El Análisis de los Procesos Físicoquímicos debe entenderse como los estudios, procedimientos, métodos y modelos que permiten el diseño de los otros tipos de análisis (químico, instrumental y quimiométrico), así como la interpretación de los resultados obtenidos y la predicción del comportamiento de los sistemas en estudio. El Análisis Instrumental es el conjunto de técnicas y métodos para realizar los procedimientos de la Química Analítica mediante el uso de instrumentos. Quienes no cultivan la investigación en Química Analítica (e incluso algunos que lo hacen) piensan que la Química Analítica sólo se ha trans-

formado de Análisis Químico en Análisis Instrumental. El Análisis Quimiométrico —o aplicación de la *Quimiometría* a las medidas y procedimientos de la Química Analítica— es el conjunto de métodos matemáticos para el procesamiento de la información química que se encuentra al realizar el Análisis Químico, el Análisis de los Procesos Físicoquímicos y el Análisis Instrumental. Quienes no realizan investigación científica en Química Analítica piensan que el análisis quimiométrico sólo es rutinario, pero la visión cambia si se piensa que no sólo hay que usar las recetas de la estadística, sino diseñar nuevos procedimientos o adaptar los ya existentes a nuevas situaciones, y ahora con la aplicación de otras áreas de la matemática.

Tal vez el investigador científico más famoso y productivo en aproximarse a este enfoque y a esta visión revolucionaria de la Química Analítica fue Izaak Maurits Kolthoff [4,5], aunque quien más defendió la incorporación del Análisis de los Procesos Físicoquímicos a la Química Analítica fue Gaston Charlot [6]. (Fotos 1 y 2)

### El desarrollo de la Química Analítica como disciplina en México a partir de 1970

En México, el desarrollo de grupos de investigación científica en Química (sin considerar los de Química Orgánica de productos naturales, que para ese entonces ya estaban establecidos y en expansión) se dio en las décadas de 1960 a 1980, principalmente en la Universidad Nacional Autónoma de México (aunque al menos se dio otro esfuerzo paralelo en la Universidad Autónoma de Nuevo León), con la creación y desarrollo de la ahora llamada División de Estudios de Posgrado de su Facultad de Química (FQ). Después de apoyar el establecimiento de los grupos de Química Inorgánica y Físicoquímica, durante la década de 1970 se brinda apoyo para desarrollar el grupo de Química Analítica, con el apoyo de profesores franceses encabezados por Bernard Trémillon (primer alumno de doctorado del profesor Charlot) [6]. En este esfuerzo debe señalarse sobre todo la participación de los profesores Alain Quéré Thorent (en la FQ) y Helmut Pitsch Klut (primero en la misma Facultad y, posteriormente, en la Escuela Nacional de Estudios Profesionales-Cuautitlán, ahora Facultad de Estudios Superiores-Cuautitlán (FES-Cuautitlán) de la misma UNAM).

Tanto Quéré como Pitsch toman la sugerencia del profesor Trémillon de comenzar por revolucionar la enseñanza de la Química Analítica contemporánea (de acuerdo a la visión y los métodos del profesor Charlot) y difundirla en todo México; para intentar, en un segundo esfuerzo, el impulso de la investigación científica en la disciplina. Así, en primer lugar se hará un breve recuento del desarrollo de la docencia en Química Analítica en la FES-Cuautitlán, para poder comprender cómo desde allí se comenzó (años después) a desarrollar grupos de investigación científica en Química Analítica.



(1)

(2)

**Fotos 1, 2.** 1) Izaak Maurits Kolthoff (1894-1993), considerado como el padre de la Química Analítica moderna. Sus ideas, que revolucionaron esta disciplina, se desarrollaron principalmente en los Estados Unidos de América. 2) Gaston Charlot (1904-1994), considerado como el padre de la Química Analítica contemporánea en Francia, porque revolucionó la enseñanza de la misma al grado que logró su reconocimiento como una disciplina autocontenida en la Academia de Ciencias de Francia.

### El desarrollo de la docencia en Química Analítica en la FES-Cuautitlán de la UNAM (1974-1986)

La tarea de desarrollar una enseñanza moderna en Química Analítica no resultó fácil, ya que los responsables de la enseñanza de la Química en el nivel superior no conocían esta visión de la Química Analítica y se oponían a invertir una parte importante de los planes de estudio de las licenciaturas de Química, Ingeniería Química y Químico Farmacéutico Biólogo en la enumeración de recetas de Análisis Químico Cualitativo y Cuantitativo, que se hacían memorizar hasta entonces. Esta incompreensión y el tamaño de México hacen que todavía ahora se tenga que continuar esta labor. La Química Analítica desarrollada por Charlot llegó a la entonces ENEP-Cuautitlán en 1974 gracias a la contratación de Margarita Rosa Gómez Moliné, quien tenía mucha experiencia de trabajo en la industria y que, habiendo conocido los libros de Charlot durante el ejercicio de su profesión de Química, quiso que en la ENEP-Cuautitlán se enseñara la Química Analítica con este enfoque. La maestra Gómez Moliné buscó en la FQ de la UNAM profesores interesados en sumarse al proyecto académico de la ENEP-Cuautitlán (que inició en 1974) y enseñar la Química Analítica, y convenció al doctor Helmut Pitsch Klut de que lo hiciera.

En esa época, bajo el liderazgo académico de Helmut Pitsch y de Margarita Rosa Gómez Moliné (Fotos 3 a 6), nos dedicamos en la ENEP-Cuautitlán a elaborar prácticas para los diferentes cursos de Química Analítica de la escuela, elaborar folletos para los mismos cursos, y divulgar la labor docente en foros de educación, como el Congreso de Educación de la Sociedad Química de México (SQM), el de la naciente Asociación Mexicana de Química Analítica (AMQA) y el del Consejo Nacional para la Educación Química (ya desaparecido).

Hacia 1980 Helmut, como lo llamábamos, nos alentaba para estudiar el doctorado o algún posgrado. Así se fueron Ignacio González Martínez y José Luis Jurado Baizaval a Francia, a estudiar el doctorado, con becas que él mismo tramitó y consiguió. Pero algunos no entendíamos por qué le parecía importante “hacer investigación científica”. Nuestra vocación docente nos demandaba todo el tiempo y no veíamos la necesidad de cambiar nuestras metas: realizar una docencia de calidad para beneficio de nuestros alumnos. No obstante, entre 1981 y 1988, Alberto Rojas Hernández realizó sus estudios de maestría en el programa de Maestría en Ciencias (Química Analítica) de la FQ de la UNAM, bajo la dirección de Josefina de Gyves, quien también le dirigió la tesis de licenciatura (Foto 7). Junto con otros profesores nos dedicamos a impulsar el desarrollo de la docencia en Química Analítica. Ejemplo de ello fueron los cursos que se impartieron a varias Instituciones de Educación Superior de la provincia mexicana, como los que se ofrecieron en la Universidad de Guanajuato, con la participación de Josefina de Gyves Marciniak, Alain Quéré Thorent y Alberto Rojas Hernández, entre otros profesores. Entre algunos de los profesores que recibieron esos cursos se pueden citar a Edith M. Colunga Urbina, Pedro Luis López De Alba, Mario Ávila Rodríguez, Ricardo Navarro Mendoza, Gustavo Pedraza Aboites, Bartolo Caudillo González y Víctor Manuel Mejía Cobos; algunos de ellos encargados de desarrollar grupos de Química Analítica en el país.

### Inicio de la investigación en Química Analítica en la UAM-Iztapalapa (1986-2000)

De la labor docente tan intensa realizada en la FES-Cuautitlán (pero desordenada, de la que muchos desarrollos académicos se perdieron por falta de disciplina y oficio) pudieron recuperarse dos esfuerzos para la investigación científica. Uno de ellos fue el establecer las bases teóricas de lo que ahora llamamos el Método de Especies y Equilibrios Generalizados, publicado en la tesis de doctorado de Alberto Rojas Hernández —dirigida por el doctor Ignacio González Martínez y en varios artículos de investigación científica [7,15]. Cabe señalar que el método mencionado es una combinación de los métodos de Charlot y Ringbom [16] para realizar representaciones gráficas y modelos termodinámicos para el estudio de sistemas multicomponentes y multirreaccionantes. En sus inicios este método fue desarrollado para dar clases en la FES-Cuautitlán, en una forma más didáctica; pero su originalidad y versatilidad pronto mostró la necesidad de desarrollarlo para realizar especiación química con fines de investigación, como lo vio el doctor Yunny Meas Vong en la UAM-Iztapalapa. El segundo esfuerzo que resultó valioso para el desarrollo de la investigación en Química Analítica en México fue el inicio de una colaboración con el doctor Salvador Alegret, investigador catalán en la línea de sensores y biosensores, por parte de varios grupos mexicanos (a raíz de un curso de biosensores que el doctor Alegret impartiera en la FES-Cuautitlán en 1986). Tal es el caso del Grupo de Bioelectrónica en el



**Fotos 3-6.** Parte de los académicos que desarrollaron la enseñanza de la Química Analítica en la ENEP-Cuautitlán entre 1975 y 1979. En esa época, prácticamente todos los ayudantes de profesor también éramos alumnos de la ENEP-Cuautitlán. Muchos nos convertimos en profesores de asignatura y algunos siguen siendo profesores de la FES-Cuautitlán hasta la fecha. 3) En la fila de arriba, en el orden acostumbrado: las profesoras, Guadalupe Pérez Caballero, Gertrudis Carreón Zamarripa, Ma. del Carmen García Eguiño y Margarita Rosa Gómez Moliné; y los ayudantes José de Jesús Pérez Saavedra y Luis Cedeño Caero. En la fila de en medio: los ayudantes Francisco García Gómez, Fernando Colmenares Landín, José Manuel Martínez Magadán, Isaac Fuentes Guevara y Francisco Javier Valle Gaytán; y los profesores Arnulfo Germán Romero Uscanga y José Franco Pérez Arévalo. Abajo: el ayudante Alberto Rojas Hernández. 4) La profesora Cecilia González Ibarra. 5) El profesor Michel Cassir Koury. 6) El técnico académico Ismael Sagrero Huitareo y las ayudantes Elia Granados Enríquez y María Teresa Ramírez Silva.

Desarrollo de Sensores y Biosensores, del Departamento de Ingeniería Eléctrica del Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados, campus Distrito Federal, en donde se encuentra el doctor Pablo Rogelio Hernández Rodríguez. Entre 1985 y 1988 los que suscribimos el presente trabajo fuimos contratados como profesores de carrera en lo que sería muy pronto el Área de Electroquímica de la UAM-Iztapalapa —cuando el Jefe de dicha Área era el doctor Yunny Meas Vong y el Jefe del Departamento de Química era el doctor José Luis Gázquez Mateos— para reforzar a dicho grupo de investigación, sobre todo en lo concerniente a la fisicoquímica de soluciones y el desarrollo de electrodos de pasta de carbono. De 1987 a 1991 María Teresa Ramírez Silva realizó sus estudios de maestría en el programa de Maestría en Química de la UAM-Iztapalapa, bajo la dirección de Ignacio González Martínez. Entre 1991 y 1992 comenzamos nuestros proyectos de doctorado y también dirigimos a los primeros egresados de la Maestría en Fisicoquímica de la FES-Cuautitlán: Adriana Morales Pérez y Carlos Andrés Galán Vidal, quienes en 1993 irían a estudiar el doctorado con el doctor Salvador Alegret.

En 1992 viene el doctor Bernard Trémillon al Congreso de la Asociación Mexicana de Química Analítica, que tuviera lugar en Saltillo, Coahuila (foto 8). Allí nos habla de su satisfacción por el desarrollo de la docencia en Química Analítica en México y nos menciona la estrategia que había diseñado Charlot para el desarrollo de la Química Analítica en México. También en 1992 presentamos trabajos en el III Spanish-Italian Congress on Thermodynamics of Metal Complexes, en Tenerife, Islas Canarias, España; en donde participaron profesores de gran renombre por sus investigaciones en cuanto a la determinación experimental de constantes de equilibrio y estudios de especiación termodinámica; a saber: Arthur E. Martell, Alberto Vacca, Felipe Brito, David R. Williams, Alfredo Mederos, Manolo Valiente y Josef Havel, entre otros. La ayuda y colaboración de varios de estos profesores, pero sobre todo del profesor Josef Havel, nos llevó a impulsar una de nuestras líneas de investigación más productivas, que hemos sostenido hasta la fecha.



**Foto 7.** Alberto Rojas Hernández y Josefina de Gyves Marciniak en el laboratorio de Electroquímica del Edificio B, FQ de la UNAM, hacia 1980.



Foto 8. Ignacio González Martínez, Bernard Trémillon y María Teresa Ramírez Silva, durante el Congreso de la Asociación Mexicana de Química Analítica en Saltillo (1992).

En 1994, María Teresa Ramírez Silva hace una estancia de investigación con el doctor Salvador Alegret, en la Universidad Autónoma de Barcelona, donde ya se encontraban Adriana Morales Pérez y Carlos Andrés Galán Vidal, y con Manolo Valiente María Elena Páez Hernández, realizando sus estudios de maestría. Entre 1995 y 1996 ambos obtenemos el grado de doctorado en la UAM-Iztapalapa, bajo la dirección de Ignacio González Martínez. En 1996 Alberto Rojas Hernández hace una estancia posdoctoral con el doctor Josef Havel, donde ya se encontraban realizando el doctorado Alma Luisa Revilla Vázquez y María Gabriela Vargas Martínez bajo su dirección (foto 9).

Después de toda esta actividad académica, entre 1998 y el año 2000, se logra crear el Área de Química Analítica en la UAM-Iztapalapa, con lo que se esperaba consolidar la investigación en Química Analítica en nuestra universidad (fig. 2).

### La investigación en Química Analítica en México (2000-2007)

La tarea de desarrollar la investigación en Química Analítica en nuestro país no ha sido fácil, en parte por las crisis económicas que se vivieron en México al final del siglo XX, que también han hecho difícil la formación de investigadores científicos en la cantidad y con la calidad requeridas que per-



Foto 9. En Brno, República Checa, 1996. Al fondo, Alma Luisa Revilla Vázquez y Alberto Rojas Hernández. En medio: Lumir Sommer (profesor de Josef Havel académico reconocido en espectrofotometría de iones metálicos con ligantes orgánicos y agentes tensoactivos) y Eladia María Peña Méndez (Universidad de La Laguna, Tenerife, España). Al frente: María Gabriela Vargas Martínez y Josef Havel.

mitirían el desarrollo de los grupos de investigación en todo el País. A pesar de estos problemas, en varias instituciones mexicanas se enseña la Química Analítica, más o menos con la visión que se muestra en la fig. 1. En un número menor de instituciones se ha logrado la implantación de algunos grupos de investigación en Química Analítica. Cabe resaltar el grupo de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, en su Centro de Investigaciones Químicas (fig. 3).

Ambos logros (docencia e investigación en Química Analítica) no siempre se han ligado a los esfuerzos realizados en la UNAM o en la UAM. Para citar ejemplos, se puede señalar el caso de las universidades del norte del país, en particular el de la Universidad Autónoma de Nuevo León, en donde se enseña la Química Analítica dentro de los esquemas del profesor Kolthoff, y con grupos de investigación en Química Analítica, tanto en su Facultad de Medicina (fig. 4) como en su Facultad de Ciencias Químicas (fig. 5). Otros ejemplos son el del grupo de Química Analítica Ambiental, en la Universidad del Mar (fig. 6), el grupo de Química Analítica de la Benémerita Universidad Autónoma de Puebla (fig. 7) y el de algunos investigadores de la Universidad de Guanajuato, en donde la investigación en Química Analítica se ha desarrollado, sobre todo, en el Instituto de Investigaciones Científicas (fig. 8).

Con la finalidad de presentar una muestra representativa de grupos de investigación en Química Analítica en la tabla 1 se presentan los cuerpos académicos reconocidos por el Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP) de la Secretaría de Educación Pública, a los cuales el mismo programa ha asignado uno de tres niveles de desarrollo. El tamaño de la tabla y los niveles de desarrollo muestran que estos grupos son pocos y continúan desarrollándose, si se comparan con grupos de investigación en otras disciplinas.

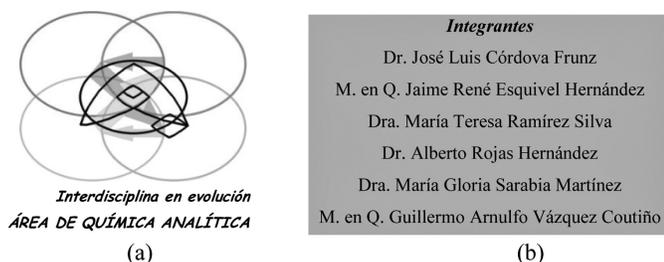


Fig. 2. a) Logotipo y lema del Área de Química Analítica de la UAM-Iztapalapa, creada en el año 2000 por el Consejo Académico de la Unidad Iztapalapa. b) Miembros fundadores del Área de Química Analítica.

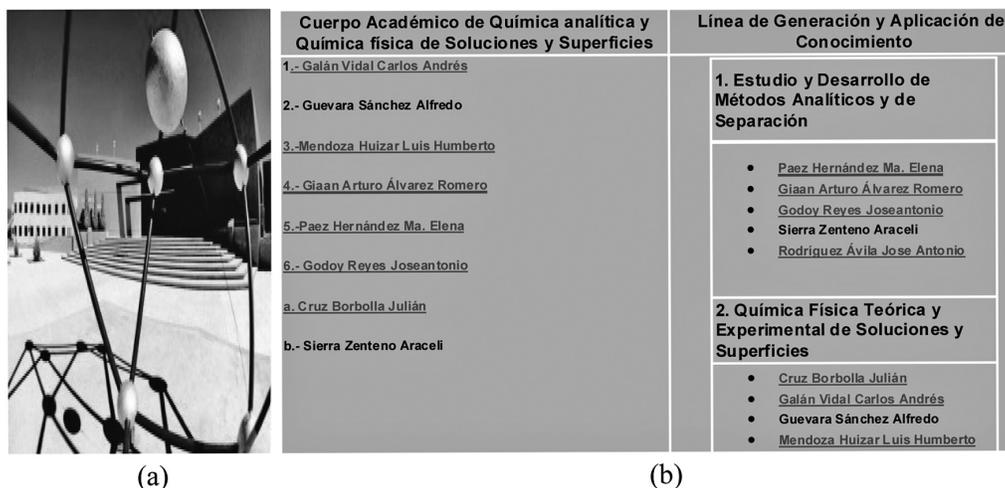


Fig. 3. a) Centro de Investigaciones Químicas de la UAEH, sede del Cuerpo Académico de Química Analítica y Química Física de Soluciones y Superficies. b) Miembros del Cuerpo Académico Mencionado. Fuente: [http://www.uaeh.edu.mx/investigacion/quimica/ca\\_lineas.htm](http://www.uaeh.edu.mx/investigacion/quimica/ca_lineas.htm)

Cabe aclarar que la lista mostrada en la tabla 1 no es exhaustiva, ya que no están representados en ella los grupos de la UNAM que hacen investigación científica en Química Analítica (debido a que la UNAM y el Instituto Politécnico Nacional no participan en el PROMEP). Así, como ejemplo, en la Facultad de Química (fig. 9) se pueden citar el grupo de cromatografía de gases, coordinado por Santiago Capella Vizcaíno, Araceli Patricia Peña Álvarez y Francisco Rojo Callejas; el de cromatografía iónica en líquidos, dirigido por Luz Elena Vera Ávila; el de espectroscopia atómica y métodos de separación, de Josefina de Gyves Marciniak y Eduardo Rodríguez de San Miguel y el Laboratorio de Electroquímica Analítica de Alejandro Baeza. También se pueden citar los grupos de la Facultad de Estudios Superiores-Cuautitlán; uno en el Campo 1 —el del Laboratorio de Control y Análisis de Medicamentos, de Alma Luisa Revilla Vázquez y Gabriela Vargas Martínez— y dos en la Unidad de Investigación Multidisciplinaria, en el Campo 4 (fig. 10): el de Físicoquímica de Soluciones, donde se encuentran Guadalupe

Pérez Caballero, José Franco Pérez Arévalo y María Eugenia Carbajal Arenas, y el de Físicoquímica Analítica, integrado por María del Rosario Moya Hernández, Rodolfo Gómez Balderas, Adriana Morales Pérez y Juan Carlos Rueda Jackson.

También se debe señalar al menos un grupo de investigación de especiación química en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (donde se encuentran Icela Dagmar Barceló Quintal y Julio Flores Rodríguez); así como dos grupos de investigación relacionados con la Química Analítica en la Universidad Autónoma de Yucatán: uno en la Facultad de Química —de Manuel Barceló Quintal y José Antonio Manzanilla— y el otro en la Facultad de Ingeniería Química, donde se encuentra María Concepción Cebada Ricalde.

Finalmente hay que mencionar a los investigadores que, formados en Química Analítica, se han incorporado a grupos de investigación en otras disciplinas. Es el caso de Ignacio González Martínez, líder en electroquímica en México; o

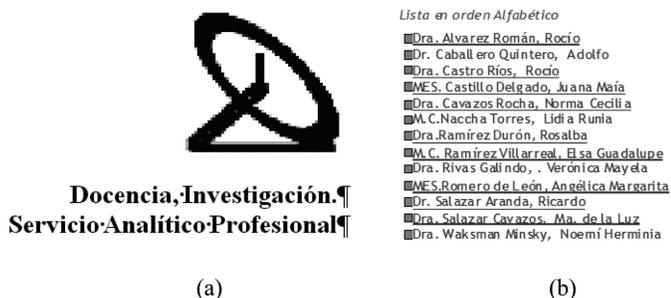


Fig. 4. a) Logotipo y lema del Departamento de Química Analítica de la Facultad de Medicina, UANL. b) Profesores del Cuerpo Académico de Química Analítica de la UANL. Fuente: <http://www.medicina.uanl.mx/quimica-analitica/profesores.htm>

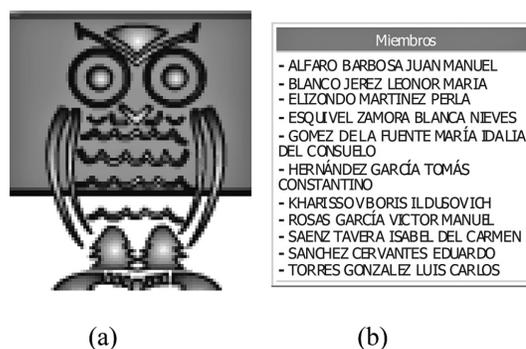


Fig. 5. a) Logotipo de la Facultad de Ciencias Químicas de la UANL. b) Miembros del Cuerpo Académico de Química, parte del cual atiende el programa de Maestría y Doctorado en Química Analítica Ambiental. Fuente: <http://portal.uat.edu.mx/cuerposacademicos/Uanl/UanlCuerpos.htm>



(a)

**Integrantes**  
 Amador Hernández Judith  
 Anaya Germán Enrique  
 Gutiérrez Ortiz María del Rocío  
 Hernández Carlos Beatriz  
 Ramírez Mares José Marco Vinicio  
 Velázquez Manzanares Miguel

(b)

**Fig. 6.** a) Escudo de la Universidad del Mar, del Sistema de Universidades de Oaxaca. b) Miembros del Cuerpo Académico de Química Analítica Ambiental de la UMar.  
 Fuente: <http://www.umar.mx/investigacion.html>



(a)

|  |                  |            |
|--|------------------|------------|
| <b>Cuerpo Académico: Química Analítica</b>     |                  |            |
| <b>Responsable: Dra. Pilar Trujillo García</b> |                  |            |
| <b>Grado de Desarrollo: En Formación</b>       |                  |            |
| Apellido Paterno                               | Apellido Materno | Nombre (s) |
| Cerna  | Cortez           | Jorge      |
| Gracia   | Vázquez          | Carlos     |
| Rodríguez                                      | Gutiérrez        | Eber Ruth  |

(b)

**Fig. 7.** a) Logotipo de la Facultad de Ciencias Químicas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. b) Miembros del Cuerpo Académico de Química Analítica de la BUAP.  
 Fuente: <http://www.buap.mx/aspirantes/licenciaturas/cquimicas/qanalitica.html>



(a)

|   |
|---|
| <b>DES: CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS</b>                    |
| <b>Integrantes</b>  |
| Dra. María Del Pilar González Muñoz                         |
| <b>Dr. Ricardo Navarro Mendoza (Responsable)</b>            |
| Dra. Teresa Imelda Saucedo Medina                           |
| Dr. Mario Ávila Rodríguez                                   |
| <b>Líneas de Generación y/o Aplicación del Conocimiento</b> |
| Química Analítica Ambiental                                 |
| Procesos de separación                                      |
| Fisicoquímica de disoluciones                               |

(b)

|  |
|--|
| <b>DES: CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS</b>   |
| <b>Integrantes</b>   |
| Mtra. Bárbara Urbina Zárate  |
| Dr. Pedro Luis López De Alba   |
| Dra. Leticia López Martínez  |
| <b>Dra. Katarzyna Wrobel Kaczmarczyk (Responsable)</b>   |
| Dr. Kazimierz Wrobel Zasada  |
| <b>Líneas de Generación y/o Aplicación del Conocimiento</b>  |
| Empleo de los métodos quimiométricos en el análisis químico.   |
| Desarrollo de los procedimientos para el análisis de los productos industriales y los materiales de interés clínico  |
| Estudios sobre la biodisponibilidad, distribución y especiación de los elementos traza en materiales medio ambientales, alimenticios y de interés clínico. |
| Aplicación de diferentes técnicas instrumentales en el análisis de los alimentos, de los productos farmacéuticos y muestras medio ambientales              |

(c)

**Fig. 8.** a) Logotipo de la Coordinación de Superación Académica de la Universidad de Guanajuato. b) Miembros del Cuerpo Académico de Química Analítica Ambiental y Procesos Industriales del Instituto de Investigaciones Científicas. c) Miembros del Cuerpo Académico de Desarrollo de Nuevos Métodos Analíticos.  
 Fuente: [http://www.siiu.ugto.mx/COSUPERA/siac.asp?ID\\_Des\\_p=5](http://www.siiu.ugto.mx/COSUPERA/siac.asp?ID_Des_p=5)



(a)

**Nombre**  
Julio Cesar Aguilar Cordero  
José Alejandro Baeza Reyes  
María del Pilar Cañizares Macias  
Santiago Capella Vizcaino  
María Asunción Castellanos Román  
Martha Patricia García Camacho  
José de Jesús García Valdés  
José Luz González Chávez  
Josefina De Gyves v Marciniak  
Araceli Patricia Peña Álvarez  
Eugenio Octavio Reyes Salas  
Guerrero Eduardo Rodríguez De San Miguel  
Francisco Rojo Callejas  
Luz Elena Vera Ávila

(b)

**Fig. 9.** a) Logotipo de la Facultad de Química de la UNAM. b) Académicos de la Facultad de Química de la UNAM que se desempeñan como profesores-investigadores en Química Analítica.  
 Fuente: [http://www.quimica.unam.mx/directorio\\_investigadores.php?depto=9&tipo=](http://www.quimica.unam.mx/directorio_investigadores.php?depto=9&tipo=)

de José Luis Jurado Baizaval, Raúl Ortega Borges y Gabriel Trejo Córdova, pertenecientes al CIDETEQ (Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, en Querétaro). También es el caso de Gabriela Roa Morales y Patricia Balderas Hernández, que se encuentran en el grupo de Química Ambiental de la Universidad Autónoma del Estado de México con Carlos Barrera Díaz; o de Manuel Eduardo Palomar Pardavé, líder del Grupo de Investigación en Materiales de la UAM-Azcapotzalco.

Como se señaló con anterioridad, la característica de los grupos citados es que sus miembros realizan investigación que se publica en revistas internacionales con arbitraje, entre otros productos. Una pequeña muestra de esta producción científica se presenta en las referencias [17-30].

De la tabla 1 se puede señalar que algunos de los miembros —no menos del 40% de los grupos de investigación en Química Analítica— recibieron algún apoyo de los profesores Alain Quéré o Helmut Pitsch (Foto 10), durante algún momento de su formación y desarrollo. Por otra parte, en la figura 11 se pueden observar las principales líneas de investigación cultivadas en México en 2007.

Otra característica que debe subrayarse es que prácticamente todos los grupos aplican en parte de sus investigaciones métodos y técnicas propios del Análisis Instrumental. Otra de las ocupaciones típicas es el desarrollo y validación de métodos analíticos, que utiliza conocimientos, métodos y técnicas del Análisis Quimiométrico o del Análisis Químico. Sin embargo, sólo una parte reducida de los grupos dedican algo de su investigación científica a conocimientos, métodos y técnicas propios del Análisis de los Procesos Fisicoquímicos. Sin embargo, esta parte de la Química Analítica es la que le per-

**Tabla 1.** Cuerpos Académicos registrados ante el PROMEP de la SEP relacionados con investigación científica en Química Analítica.

| Institución  | Cuerpo Académico   | Grado de Desarrollo Reconocido por el PROMEP | Objetivos o Líneas de Generación y Aplicación del Conocimiento de Química Analítica  |
|--|--|--|--|
| Universidad Autónoma de Nayarit<br>Ciencias Básicas e Ingenierías                          | Química  | En formación                                 | Determinar la presencia y cantidad de metales pesados y tóxicos al ser humano, en sedimentos de presas, ríos y mares; así como en plantas, peces y animales consumidos por los humanos.  |
| Universidad Autónoma de Coahuila<br>Facultad de Ciencias Químicas                          | Química Analítica  | En formación                                 | Estudios técnicos y científicos para el desarrollo de nuevos métodos analíticos que apoyen el análisis químico, así como la validación de los mismos.  |
| Universidad Autónoma de Chihuahua<br>Ingeniería  | Química Aplicada   | En formación                                 | Métodos de determinación y de separación de especies químicas enfocados principalmente en la purificación de sustancias de valor agregado y remediación ambiental.   |
| Universidad Autónoma de Chiapas<br>Facultad de Ciencias Químicas Campus IV                 | Salud Ambiental y Ocupacional                                  | En formación                                 | Desarrollo y estandarización de métodos para la determinación de contaminantes ambientales.  |
| Universidad de Guanajuato<br>Ciencias Naturales y Exactas                                  | Desarrollo de Nuevos Métodos Analíticos                        | En consolidación                             | Desarrollo de los procedimientos para el análisis de los productos industriales y los materiales de interés clínico Estudios sobre la biodisponibilidad, distribución y especiación de los elementos traza en materiales medio ambientales, alimenticios y de interés clínico Aplicación de diferentes técnicas instrumentales en el análisis de los alimentos, de los productos farmacéuticos y muestras medio ambientales Empleo de los métodos quimiométricos en el análisis químico. |
| Universidad Autónoma de Nuevo León<br>Facultad de Ciencias Químicas                        | Química  | En consolidación                             | Implementar técnicas instrumentales modernas (difracción de rayos x, cromatografía de gases y de líquidos, absorción atómica) para el monitoreo de contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos en agua, suelo y aire.  |
| Benemérita Universidad Autónoma de Puebla<br>Ciencias Naturales                            | Química Analítica  | En consolidación                             | Aplicación de técnicas analíticas: al análisis de estructuras poliméricas y de iniciadores, así como a la determinación de principios activos específicos en plantas y su posterior aplicación a clínicos y farmacia.  |
| Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa<br>División de Ciencias Básicas e Ingeniería | Química Analítica  | En consolidación                             | Determinación experimental de constantes de equilibrio en sistemas multicomponentes y multirreaccionantes a través de diferentes métodos.  |
| Universidad del Mar<br>Instituto de Ecología   | Química Ambiental  | En consolidación                             | Análisis químico de contaminantes  |
| Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo<br>Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería   | Química Analítica y Química Física de Soluciones y Superficies | En consolidación                             | Química Física teórica y experimental de soluciones y superficies Estudio y desarrollo de métodos analíticos y de separación   |
| Universidad Autónoma de Nuevo León<br>Facultad de Medicina                                 | Química Analítica  | Consolidado                                  | Aislamiento biodirigido de productos naturales con actividad farmacológica. Desarrollo, validación y aplicación de métodos analíticos.   |
| Universidad de Guanajuato<br>Ciencias Naturales y Exactas                                  | Química Analítica Ambiental y de Procesos Industriales         | Consolidado                                  | Química analítica ambiental Procesos de separación Físico-química de soluciones  |

Fuente: <http://promep.sep.gob.mx/> (consultada el 29 de noviembre de 2007). Se realizó la búsqueda por las palabras clave química analítica, análisis químico y métodos analíticos.



(a)

|  |   |   |
|--|---|---|
| Fisicoquímica Analítica<br><i>Laboratorio 10</i>     | Dra. Rosario Moya Hernández                                       | Dra. Adriana Morales Pérez<br>Dr. Rodolfo Gómez Balderas<br>MEnC. Juan Carlos Rueda Jackson |
| Fisicoquímica de Soluciones<br><i>Laboratorio 11</i> | Dr. José Franco Pérez Arévalo<br>Dr. Juan Manuel Aceves Hernández | M.C. Guadalupe Pérez Caballero<br>Qui. Ma. Eugenia Carbajal Arenas                          |

(b)

**Fig. 10.** a) Detalle del edificio sede de la Unidad de Investigación Multidisciplinaria (UIM), Campo 4, de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán de la UNAM. b) Académicos de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán de la UNAM que realizan su investigación, en Química Analítica, en las instalaciones de la UIM en el Campo 4.

Fuente: <http://fesc.cuautitlan2.unam.mx/investigacion/uim.html>

mite trascender el Análisis Químico propiamente dicho para proyectarse a la Química Aplicada y a la Química Industrial, lo que le dio prestigio al profesor Charlot y revitalizó el estudio de la Química Analítica en Francia [6].

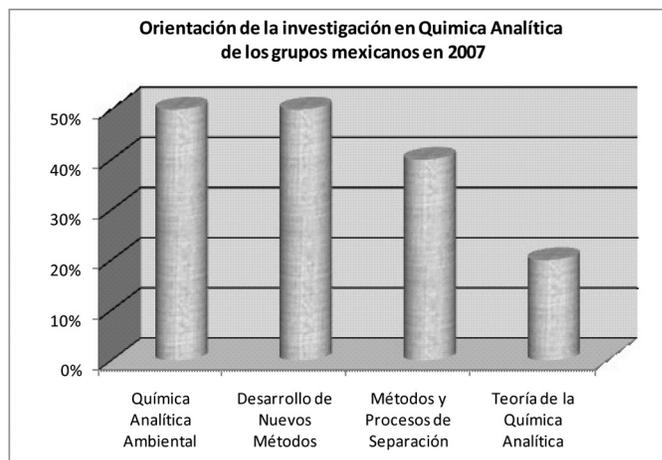
Para concluir este apartado se pueden citar también los esfuerzos de la Asociación Mexicana de Química Analítica que después del XVI Congreso Nacional de Química Analítica ha editado las memorias en extenso de los eventos de ese tipo [31]. En estas memorias está compilada una gran cantidad de investigaciones, fundamentales y aplicadas, que se han realizado en Química Analítica en México.



Foto 10. María Teresa Ramírez Silva, Helmut Pitsch Klut y Alberto Rojas Hernández en el Congreso Nacional de Química Analítica, de la Asociación Mexicana de Química Analítica, Xalapa, Veracruz, 2002.

### El futuro de la investigación científica en Química Analítica en México

La investigación científica en Química Analítica en el País tiene que darse naturalmente en el desarrollo de nuevos métodos analíticos y su aplicación, como se hace en todo el mundo. Pero también hay grupos mexicanos que han realizado estudios en donde se proponen nuevas metodologías para la predicción e interpretación del comportamiento químico de los sistemas. Tal vez el mejor ejemplo de esta afirmación sea la propuesta y desarrollo del Método de Especies y Equilibrios Generalizados [7-15]. Las representaciones gráficas e interpretaciones de las mismas han sido aplicadas por diferentes grupos —en México y en el extranjero— para explicar diferentes procesos, tales como el depósito electroquímico de metales y óxidos de ele-



**Fig. 11.** Porcentaje de las líneas de investigación principales que se cultivadas por los diferentes grupos de investigación en Química Analítica de acuerdo a la información de la tabla 1.

mentos metálicos, la formación de precursores para catalizadores, los procesos de separación, la especiación química en diferentes sistemas y la movilidad de especies en aguas naturales, entre otros. Una pequeña muestra de estos trabajos puede encontrarse en las referencias [32-36].

Varios grupos mexicanos de investigación en Química Analítica exploran las posibilidades de resolver problemas de la Química Aplicada y la Química Industrial con las metodologías propias del Análisis de los Procesos Físicoquímicos, siguiendo de esta manera el camino trazado por el profesor Gaston Charlot. Se espera que esta orientación continúe y se extienda, porque nuestro país es de los pocos lugares en el mundo donde estos estudios se consideran parte de la Química Analítica contemporánea, y porque este enfoque promete contribuir con aportaciones relevantes a la comprensión de sistemas complejos que involucran materia suave o blanda, como las pastas y los materiales *composite*, entre otros temas de desarrollo para el Siglo XXI.

## Referencias

- Szabadváry, F. *History of Analytical Chemistry*. Gordon and Breach Science Publishers. Yverdon (Suiza). **1960**, 418 p.
- Capella Vizcaíno, S. La Química Analítica en México: Un Panorama. En: Andoni Garriz Ruiz; *Química en México: Ayer, Hoy y Mañana*. Facultad de Química, UNAM. México. **1991**. pp. 441-456.
- Laitinen, H. A.; Harris, W. A. *Análisis Químico: Texto Avanzado y de Referencia*. Reverté. Barcelona. **1982**.
- Rojas-Hernández, A. Izaak Maurits Kolthoff: Maestro Universal y Padre de la Química Analítica Moderna. *Contactos*. 3ª época. UAM-Iztapalapa. México. **1999**, 1, No. 3, 5-9.
- <http://technolog.it.umn.edu/technolog/issues/spring2004/kolthoff.htm>. Página consultada el 27 de febrero de **2009**.
- Trémillon B. Homenaje a Gaston Charlot. *Educación Química* **1998**, 9, 67-72.
- Rojas Hernández, A. El Método de Especies y Equilibrios Generalizados Para el Estudio de Sistemas Químicos en Equilibrio Bajo Condiciones de Amortiguamiento: Teoría y Algoritmos de los Diagramas de Zonas de Predominio. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, México, **1995**.
- Rojas, A.; González, I. Relationship of Two-dimensional Predominance-Zone Diagrams with Conditional Constants for Complexation Equilibria, *Analytica Chimica Acta* **1986**, 187, 279-285.
- Rojas-Hernández, A.; Ramírez, M. T.; González, I.; Ibáñez, J. G. Construction of Multicomponent Pourbaix Diagrams Using Generalized Species. *J. Electrochem. Soc.* **1991**, 138, 365-375.
- Rojas-Hernández, A.; Ramírez, M. T.; González, I.; Ibáñez, J. G. Relationship of Multidimensional Predominance-zone Diagrams with Multiconditional Constants for Complexation Equilibria. *Anal. Chim. Acta* **1991**, 246, 435-442.
- Rojas-Hernández, A.; Ramírez, M. T.; González, I.; Ibáñez, J. G. Multi-dimensional Predominance-zone Diagrams for Polynuclear Chemical Species. *Anal. Chim. Acta* **1992**, 259, 95-105.
- Rojas-Hernández, A.; Ramírez, M. T.; González, I.; Ibáñez, J. G. Equilibria among condensed phases and a multi-component solution using the concept of generalized species. I. Systems with mixed complexes. *Anal. Chim. Acta* **1993**, 278, 321-334.
- Rojas-Hernández, A.; Ramírez, M. T.; González, I.; Ibáñez, J. G. Equilibria among condensed phases and a multi-component solution using the concept of generalized species. II. Systems with poly-nuclear species. *Anal. Chim. Acta* **1993**, 278, 335-347.
- Rojas-Hernández, A.; Ramírez, M. T.; González, I. Distribution of Mononuclear Chemical Species in Two-Phase Multicomponent Systems Using Generalized Species and Equilibria. *Química Analítica*. **1996**, 15, Supl. 1, pp. S4-S8.
- Páez-Hernández, M. E.; Ramírez, M. T.; Rojas-Hernández, A. Predominance-Zone Diagrams and Their Application to Solvent Extraction Techniques. *Talanta* **2000**, 51, 107-121.
- Ringbom, A.; *Complexation in Analytical Chemistry*. Wiley-Interscience. New York. **1963**.
- Pérez, A.; Ramírez-Durón, R.; Piñeyro-López, A.; Waksman, N.; Reichert, M.; Bringmann, G. The absolute configuration of peroxisomicines A1 and A2, *Tetrahedron* **2004**, 60, 8547-8552.
- Galán-Vidal, C. A.; Páez-Hernández, M. E. Screen-Printing Electrochemical Sensors for Environmental Studies; in: Applications of Analytical Chemistry in Environmental Research. M. E. Palomar Pardavé, Ed. 23-36. **2005**. ISBN: 81-308-0057-8.
- Lambert, J.; Rakib, M.; Durand, G.; Avila-Rodríguez, M. Treatment of Solutions Containing Trivalent Chromium by Electrodialysis. *Desalination* **2006**, 191, 100-110.
- Guzmán, J.; Saucedo, I.; Navarro, R.; Revilla, J.; Guibal, E. Vanadium Interactions with Chitosan: Influence of Polymer Protonation and Metal Speciation. *Langmuir* **2002**, 18, 1567-1573.
- López de Alba, P. L.; López-Martínez, L.; Cerdá, V.; Amador-Hernández, J. Simultaneous Determination and Classification of Riboflavin, Thiamine, Nicotinamide and Pyridoxine in Pharmaceutical Formulations, by UV-Visible Spectrophotometry and Multivariate Analysis. *J. Braz. Chem. Soc.* **2006**, 17, 715-722.
- Wróbel-Zasada, K.; Wróbel-Kaczmarczyk, K.; Colunga-Urbina, E. M.; Muñoz-Romero, J. Determination of 3-Nitrophenol and Some Other Aromatic Impurities in 4-Nitrophenol by Reversed Phase HPLC with Peak Suppression Diode Array Detection. *J. Pharm. Biomed. Anal.* **2000**, 22, 295-300.
- Vera-Ávila, L. E.; Vázquez-Lira, J. C.; García De Llasera, M.; Covarrubias, R. Sol-Gel Immunosorbents Doped with Polyclonal Antibodies for the Selective Extraction of Malathion and Triazines form Aqueous Samples. *Environ. Sci. Technol.* **2005**, 39, 5421-5426.
- Ballinas, M. L.; Rodríguez De San Miguel, E.; Rodríguez, M. T. J.; Silva, O.; Muñoz, M.; de Gyves, J. Arsenic (V) Removal with Polymer Inclusion Membranes from Sulfuric Acid Media Using DBBP as Carrier. *Env. Sci. Technol.* **2004**, 38, 886-891.
- Mayén-Mondragón, R.; Baeza, A.; Ibáñez, J. G. Simultaneous Determination of Nickel and Cadmium by Differential Pulse Polarography. *Anal. Sci.* **2002**, 18, 1-3.
- Segura Pacheco, B.; Pérez-Cárdenas, E.; Taja-Chayeb, L.; Chávez-Blanco, A.; Revilla-Vázquez, A.; Benítez-Bribiesca, L.; Dueñas-González, A. Global DNA Hypermethylation-Associated Cancer Chemotherapy Resistance and its Reversion with the Demethylating Agent Hyalalazine. *J. Translat. Med.* **2006**, 4, 32-44.
- Moya-Hernández, M. R.; Mederos, A.; Domínguez, S.; Orlandini, C.; Ghilardi, A. Ceconi, F.; González-Vergara, E.; Rojas-Hernández, A. Speciation study of the anti-inflammatory drug tenoxicam (Htenox) with Cu(II): X-ray crystal structure of [Cu(tenox)<sub>2</sub>(py)<sub>2</sub>]-EtOH, *J. Inorg. Biochem.* **2003**, 95, 131-140.
- Álvarez-Romero, G. A.; Morales-Pérez, A.; Rojas-Hernández, A.; Palomar-Pardavé, M. E.; Ramírez-Silva, M. T. Development of a Tubular Sensor Based on a Polypyrrole-Doped Membrane for the Potentiometric Determination of the Dodecylsulfate Anion in a FIA System. *Electroanalysis* **2004**, 16, 1236-1243.
- Balderas-Hernández, P.; Ramírez-Silva, M. T.; Romero-Romo, M. A.; Palomar-Pardavé, M. E.; Roa-Morales, G.; Barrera-Díaz, C.; Rojas-Hernández, A. Experimental Correlation Between the pKa Value of Sulfonphthaleins with the Nature of the Substituents Groups. *Spectrochimica Acta Part A* **2008**, 69, 1235-1245.

30. Cobos-Murcia, J. A.; Galicia, L.; Rojas-Hernández, A.; Ramírez-Silva, M. T.; Álvarez-Bustamante, R.; Romero-Romo, M. A.; Rosquete-Pina, G.; Palomar Pardavé, M. E. Electrochemical Polymerisation of 5-amino-1,10-phenantroline Onto Different Substrates. Experimental and Theoretical Studies. *Polymer* **2005**, *46*, 9053-9063.
31. Asociación Mexicana de Química Analítica. Fundamentos y Aplicaciones de la Química Analítica **2002, 2004, 2005, 2006**. En estas obras, editadas en formato electrónico, se reúnen las memorias de los Congresos Nacionales de Química Analítica del XVII al XX. Con otro nombre también se han rescatado las memorias en extenso de los Congresos XXI y XXII. (Consultar <http://amqa.org.mx>)
32. Rodríguez-Torres, I.; Valentin, G.; Chanel, S.; Lopicque, F. Recovery of Zinc and Nickel from Electrogalvanisation Sludges Using Glycine Solutions. *Electrochim. Acta.* **2000**, *46*, 279-287.
33. Mishra, B. G.; Rao, G. R. Cerium Containing Al- and Zr-Pillared Clays: Promoting Effect of Cerium (III) Ions on Structural and Catalytic properties, *J. Porous Mat.* **2005**, *12*, 171-181.
34. Núñez-López, R. A.; Meas, Y.; Gama, S. C.; Ortega Borges, R.; Olguín, E. J. Leaching of Lead by Ammonium Salts and EDTA from *Salvinia minima* Biomass Produced During Aquatic Phytoremediation. *J. Hazardous. Mat.* **2008**, *154*, 623-632.
35. Ortiz-Aparicio, J. L.; Meas, Y.; Trejo, G.; Ortega, R.; Chapman, T. W.; Chainet, E.; Ozil, P. Effect of Quaternary Ammonium Compounds on the Electrodeposition of ZnCo Alloys from Alkaline Gluconate Baths. *J. Electrochem. Soc.* **2008**, *155*, D167-D175.
36. Romero-Guzmán, E. T.; Ordóñez-Regil, E.; Reyes-Gutiérrez, L. R.; Esteller-Alberich, M. V.; Rojas-Hernández, A.; Ordóñez-Regil, E. Contamination of Corn Growing Areas Due to Intensive Fertilization in the High Plane of Mexico. *Water, Air and Soil Pollution* **2006**, *175*, 77-98.