



- REVISTA DE -

MEDICINA DE LABORATORIO

Utilidad de la espectrometría de masas para el análisis de metabolitos en líquido cefalorraquídeo de pacientes con errores congénitos del metabolismo

Mass spectrometry utility for the analysis of cerebrospinal fluid metabolites from patients with inborn errors of metabolism

10.20960/revmedlab.00150

01/05/2023

Utilidad de la espectrometría de masas para el análisis de metabolitos en líquido cefalorraquídeo de pacientes con errores congénitos del metabolismo

Mass spectrometry utility for the analysis of cerebrospinal

5 *fluid metabolites from patients with inborn errors of metabolism*

Maria Antònia Caro-Miró¹, Blai Morales-Romero^{1,2}, Judit García-Villoria¹⁻³

¹Sección de Errores Congénitos del Metabolismo-IBC. Servicio de

10 Bioquímica y Genética Molecular. Centro de Diagnóstico Biomédico. Hospital Clínic. Barcelona. ²Institut d'Investigacions Biomèdiques August Pi i Sunyer (IDIBAPS). Barcelona. ³Centro de Investigación Biomédica en Red de Enfermedades Raras (CIBERER).

15 Correspondencia: Maria Antònia Caro Miró. Sección de Errores Congénitos del Metabolismo. IBC-Clínic. C/ Mejía Lequerica, s/n. Edificio Helios III. 08028 Barcelona. e-e-mail: macaro@clinic.cat

Recibido: 14/09/2022

20 Aceptado: 17/12/2022

Conflictos de intereses: los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés en la publicación de este artículo de revisión.

25 RESUMEN

Los errores congénitos del metabolismo de los neurotransmisores son enfermedades poco prevalentes que cursan con síntomas en el sistema nervioso central y, en algunos casos, afectan también al nivel periférico. En general, estos pacientes tienen que pasar por largos

30 procesos hasta conocer su diagnóstico definitivo. El análisis de los metabolitos en el líquido cefalorraquídeo por espectrometría de masas en tandem presenta unas buenas sensibilidad y especificidad, agiliza el diagnóstico bioquímico y optimiza el uso de la muestra. En

los últimos años, se tiende al estudio de paneles de metabolitos para
35 facilitar el diagnóstico.

Palabras clave: Enfermedades genéticas congénitas. Agentes neurotransmisores. Aminas biógenas. Líquido cefalorraquídeo. Espectrometría de masas.

40

ABSTRACT

Inborn errors of neurotransmitter metabolism are rare diseases with central nervous system symptoms and, in some cases, peripheral involvement. In general, these patients must go through long
45 processes before a definitive diagnosis is made. The analysis of cerebrospinal fluid metabolites by mass spectrometry has good sensitivity and specificity, speeds up biochemical diagnosis and optimises the use of the sample. In recent years, the trend has been towards the study of metabolites panels to facilitate the diagnosis.

50

Keywords: Genetic diseases inborn. Neurotransmitter agents. Biogenic amines. Cerebrospinal fluid. Mass spectrometry.

INTRODUCCIÓN

55 Desde principios del siglo xx, cuando se estableció la definición de *error congénito del metabolismo*, atribuida al médico inglés Archibald Edward Garrod, que se basó en estudios realizados con pacientes afectados de alcaptonuria, albinismo, cistinuria y pentosuria (1), hasta la actualidad, se han producido múltiples avances en el área de
60 conocimiento de las enfermedades metabólicas hereditarias. La implementación de la tecnología de espectrometría de masas en tandem (MS/MS) en los programas de cribado neonatal realizados a partir de sangre seca del talón de los recién nacidos, con sus altas sensibilidad y especificidad, constituye un gran hito que ha permitido
65 mejorar el rendimiento diagnóstico de un elevado número de enfermedades metabólicas hereditarias (2). Sin embargo, los

pacientes que padecen otras patologías que no presentan marcadores bioquímicos periféricos continúan experimentando una larga odisea diagnóstica (3).

70 En la actualidad, el estudio de metabolitos que se realiza para diagnosticar estas entidades puede llevarse a cabo mediante dos estrategias. Por un lado, encontramos la metodología dirigida (la más extendida en los laboratorios clínicos), centrada en el estudio de un panel de metabolitos relacionados con la sospecha clínica. Por otro 75 lado, la metodología no dirigida está basada en el estudio de un número muy elevado de metabolitos, incluyendo los que no están relacionados con la sospecha clínica inicial (4). Sin embargo, actualmente esta tecnología solo está disponible en centros muy especializados. Es importante recalcar que estos avances han ido de 80 la mano de la creación de multitud de bases de datos, entre las que destaca la Human Metabolome Database (5).

Un número importante de enfermedades metabólicas hereditarias cursan con afectación del sistema nervioso central, que interfiere en el proceso de neurodesarrollo y predispone a la neurodegeneración 85 (6). No obstante, los defectos primarios del metabolismo y del transporte de los neurotransmisores son un grupo de enfermedades neurometabólicas muy poco frecuentes (7,8) que pueden afectar tanto a pacientes pediátricos como a adultos (7). Por ello, ante la sospecha de la mayoría de estas patologías se requiere el análisis de 90 determinados metabolitos en líquido cefalorraquídeo (LCR) (9). En los últimos años se ha constituido un grupo de trabajo a nivel internacional para el estudio de estas enfermedades (International Working Group on Neurotransmitter Related Disorders) cuyo objetivo principal es la creación de un registro global de pacientes (8).

95 En esta revisión se pretende describir el estado del arte del estudio de los principales metabolitos presentes en LCR de pacientes con errores congénitos del metabolismo de los neurotransmisores, ya sean defectos enzimáticos primarios o de sus cofactores, mediante

cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas en tandem

100 (LC-MS/MS).

En los últimos años, la espectrometría de masas en tandem ha ido

sustituyendo a las técnicas de cromatografía líquida de alto

rendimiento (HPLC) acoplada a detección electroquímica o

fluorescente para la cuantificación de metabolitos presentes en LCR

105 de pacientes con errores congénitos del metabolismo de los

neurotransmisores (10). Básicamente esto se debe a las mayores

sensibilidad y especificidad de los detectores de espectrometría de

masas en comparación con los detectores electroquímicos o

fluorescentes. Por otro lado, también se ha puesto de manifiesto la

110 necesidad de optimizar el uso de la muestra de LCR con el objetivo de

poder analizar paneles de metabolitos de forma más rápida y con un

menor volumen (3).

ERRORES CONGÉNITOS DEL METABOLISMO DE LAS AMINAS

115 **BIÓGENAS**

Los neurotransmisores monoaminérgicos son moléculas derivadas de

aminoácidos aromáticos (fenilalanina, tirosina y triptófano) implicadas

en procesos de señalización (11). En esta revisión nos centraremos en

los defectos primarios del metabolismo de las catecolaminas

120 (adrenalina, noradrenalina y dopamina) y de la serotonina. Estos

pueden clasificarse en defectos enzimáticos primarios y deficiencias

de la tetrahidrobiopteterina (BH_4), que actúa como cofactor enzimático

de la tirosina hidroxilasa (TH), de la triptófano hidroxilasa (TPH) y de

la fenilalanina hidroxilasa (PAH), entre otras enzimas.

125 En la tabla I se muestran las alteraciones de metabolitos en los

errores congénitos del metabolismo de las aminas biógenas, su tipo

de herencia y su número Online Mendelian Inheritance in Man (OMIM).

Por otro lado, en la figura 1 se representan las principales rutas

metabólicas implicadas en los errores congénitos del metabolismo de

130 las aminas biógenas.

En primer lugar, destacaremos la deficiencia de la TH y la deficiencia de la carboxilasa de los aminoácidos aromáticos (AADC). Estas patologías se incluyen en los defectos enzimáticos primarios del metabolismo de las aminas biógenas y para su diagnóstico es imprescindible el análisis de determinados metabolitos en LCR. La TH es la enzima limitante de la síntesis de las catecolaminas, por lo que su deficiencia provoca una disminución en LCR de la concentración de ácido homovanílico (HVA), metabolito producido a partir de la dopamina y 3-metoxi-4-hidroxifenilglicol (MHPG) (9,12). Por otro lado, la AADC es la enzima que cataliza el último paso de la vía de síntesis de la dopamina y serotonina. Su deficiencia genera una disminución de las concentraciones de HVA y ácido 5-hidroxiindolacético (5-HIAA) acompañada de un incremento en las concentraciones de 3-O-metildopa (3-OMD) y 5-hidroxitriptófano (5-HTP) en LCR (9). Por último, también se observa un incremento en la concentración de ácido vanil-láctico en orina detectado mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS) (13), cuya cuantificación es de utilidad para el diagnóstico.

Por otro lado, las patologías relacionadas con la deficiencia de BH₄ se clasifican en dos grupos: las que cursan con hiperfenilalaninemia y las que no cursan con hiperfenilalaninemia.

Las deficiencias de BH₄ que cursan con hiperfenilalaninemia pueden detectarse en los programas de cribado neonatal mediante una elevación de fenilalanina o una alteración del ratio fenilalanina/tirosina en sangre seca obtenida del talón de los recién nacidos y analizada mediante MS/MS. Posteriormente, ante una detección positiva en el programa de cribado, deben realizarse otras pruebas complementarias para su confirmación bioquímica, como la determinación de los niveles de fenilalanina en plasma, la cuantificación de las pterinas en orina o incluso la determinación de determinados metabolitos en LCR (15). Podemos diferenciar dos subgrupos: la deficiencia de enzimas que participan en la síntesis de la BH₄ y el déficit de enzimas implicadas en su regeneración. La

guanosina-5'-trifosfato ciclohidrolasa I (GTPCH I) es la enzima limitante de la vía de síntesis de la BH_4 . Su deficiencia heredada de forma autosómica recesiva (AR) provoca una disminución de las concentraciones de HVA y 5-HIAA en LCR, además de una disminución de biopterina (BP) y neopterina (NP) en orina. La enzima 6-piruvicotetrahidropterina sintasa (PTPS) elimina el grupo trifosfato de la 7,8-dihidroneopterina trifosfato (DHNTP), y mediante una reacción de óxido-reducción, genera la molécula 6-piruvicotetrahidropterina, que posteriormente será convertida en BH_4 por la acción de la sepiapterina reductasa (SPR). La deficiencia enzimática de la PTPS es el desorden más frecuente del metabolismo de las pterinas (16). En LCR se observa una baja concentración de HVA y 5-HIAA, además de una disminución en los metabolitos de la vía de las pterinas, excepto la NP, que se encuentra elevada. En orina, también se demuestra la reducción de los metabolitos de la vía de las pterinas acompañada de un aumento en la concentración de NP (17). En la regeneración de la BH_4 participan la pterina-4 α -carbaminolamina dehidratasa (PCD) y la dihidropterina reductasa (DHPR). La primera cataliza la conversión de la pterina-4 α -carbaminolamina en quininoide dihidrobiopterina (q- BH_2) y la segunda genera la molécula de BH_4 a partir de la q- BH_2 (16). En la deficiencia enzimática de la PCD, en general, no se observan alteraciones del perfil de los neurotransmisores en el LCR e incluso algunos pacientes pueden ser asintomáticos (16,18). El déficit de la DHPR constituye la segunda deficiencia más prevalente de las enzimas implicadas en el metabolismo de las pterinas (19). La disminución de la actividad de esta enzima provoca un descenso en la concentración de HVA, 5-HIAA y 5-metiltetrahidrofolato (5-MTHF) acompañada de un aumento de BP en LCR (17,18).

Las deficiencias de BH_4 que no cursan con hiperfenilalaninemia engloban la distonía sensible a levodopa (L-DOPA) o deficiencia de GTPCH I con herencia autosómica dominante (AD) y la deficiencia de SPR, heredada generalmente de forma AR, aunque existe un paciente descrito en la bibliografía con herencia AD (20). Los pacientes

afectados de distonía sensible a L-DOPA o deficiencia de GTPCH I con herencia AD muestran una disminución de las concentraciones de HVA, 5-HIAA, NP, BP y BH₄ en LCR (7,12), ya que presentan una 200 alteración en la vía de síntesis de la BH₄. Por otro lado, la deficiencia de SPR, enzima implicada en el último paso en la síntesis de la BH₄, provoca una disminución de las concentraciones de HVA, 5-HIAA y BH₄ acompañada de un incremento en las concentraciones de sepiapterina (SP), BP y 7,8-dihidrobiopteterina (BH₂) en LCR, además de 205 un incremento de SP en orina (11,12).

Principales técnicas para el análisis de metabolitos presentes en LCR de pacientes con errores congénitos del metabolismo de las aminas biógenas

210 En el artículo de Mena *et al.* (21) se describen las condiciones cromatográficas para el análisis de las aminas biógenas en LCR mediante HPLC de fase reversa acoplada a un detector electroquímico (ED). En la publicación de Ormazábal *et al.* (22) se exponen los valores de referencia de HVA, 5-HIAA, 3-OMD, 5-HTP y MHPG en LCR 215 analizados mediante HPLC acoplado a ED en una población pediátrica control, además de en pacientes con déficit de TH y de GTPCH I. En los últimos años, debido a sus mayores sensibilidad y especificidad de detección y cuantificación, muchos laboratorios han implementado la tecnología de espectrometría de masas en tandem para el estudio de 220 los neurotransmisores. Sin embargo, debido a la elevada polaridad que presentan gran parte de estos metabolitos, su capacidad de retención en las columnas de los sistemas de HPLC de fase reversa es baja. Por ello, su análisis es complicado y su sensibilidad de detección puede verse disminuida. Así, en algunos casos, puede ser necesario 225 realizar procesos previos de derivatización (23) o utilizar sistemas de cromatografía de interacción hidrofílica (HILIC) (24) que permitan alargar los tiempos de retención y, consecuentemente, aumentar su sensibilidad de detección. No obstante, modificando las condiciones cromatográficas y la composición de la fase móvil también puede

230 optimizarse la retención de estos metabolitos en columnas C18 de fase reversa (25-27). En el artículo de Wassenberger *et al.* (14) se describen los valores de distintos metabolitos en LCR, además de en suero y en orina, en pacientes con deficiencia de TH y deficiencia de AADC antes y durante el tratamiento.

235 El primer método descrito para llevar a cabo el análisis de las pterinas en LCR requería de una etapa de oxidación previa de las formas reducidas de la BP en la que su análisis tenía que realizarse por separado (28). Unos años más tarde se publicó otro método que permitía el análisis simultáneo de las formas oxidadas y reducidas de

240 la BP (29). Sin embargo, se ha cuestionado la especificidad de este último (10). En el artículo de Ormazábal *et al.* (22) se exponen los valores de referencia de la NP y de la BP en LCR analizados mediante HPLC de fase reversa acoplada a un detector de fluorescencia (FD) en una población pediátrica control, además de en pacientes con déficit

245 de TH y de GTPCH I. En la publicación de Arning *et al.* (30) se describe un método para la determinación de la BH₄, BH₂, NP y SP en LCR mediante LC-MS/MS con dilución isotópica.

ERRORES CONGÉNITOS DEL METABOLISMO DEL ÁCIDO Γ -

250 AMINOBUTÍRICO (GABA)

En este apartado van a describirse las principales patologías relacionadas con los defectos del catabolismo del ácido γ -aminobutírico (GABA) en las que el análisis de determinados metabolitos en LCR es de utilidad. En esta revisión no van a tratarse 255 los defectos de receptores y de transportadores del GABA, ya que su diagnóstico es predominantemente genético (12).

En la tabla I se muestran las alteraciones de metabolitos en los errores congénitos del metabolismo del GABA, su tipo de herencia y su número OMIM. Por otro lado, en la figura 2 se representan las 260 principales rutas metabólicas implicadas en los errores congénitos del metabolismo del GABA.

La deficiencia de la GABA transaminasa (GABA-T) produce una alteración en la vía de degradación del GABA, lo que genera su acumulación en LCR, además de un aumento en la concentración de 265 β -alanina (31,32). En el artículo de Jaeken *et al.* (33) se describen dos casos clínicos en los que se demuestra la utilidad de los marcadores citados en LCR ante la sospecha diagnóstica de esta patología.

La deficiencia de la succinato semialdehído deshidrogenasa (SSADHD) también cursa con una alteración en el metabolismo del GABA (34). 270 Los pacientes que padecen este déficit enzimático presentan una acumulación de GABA en LCR, además de ácido γ -hidroxibutírico (GHB), un potente depresor del sistema nervioso central que también puede detectarse en orina, homocarnosina y carnosina (dipéptido formado por β -alanina y L-histidina) (31). En general, ante la sospecha 275 de esta patología, se realiza un perfil de ácidos orgánicos en orina como prueba de cribado. Sin embargo, el análisis del LCR también puede ser de utilidad (34).

Principales técnicas para el análisis de metabolitos presentes 280 en LCR de pacientes con errores congénitos del metabolismo del GABA

Se han descrito varios métodos para el análisis del GABA: HPLC acoplada a FD (HPLC-FD) (35), HPLC-ED (36) o cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS), entre otras. No 285 obstante, la mayoría requiere de largos protocolos de preparación de la muestra y de procesos de derivatización antes de su análisis (37). En el artículo de Arning *et al.* (37) se describe un método para la cuantificación del GABA total y libre presente en LCR a través de LC-MS/MS con dilución isotópica y sin derivatización previa. La 290 cuantificación del GABA total y libre se realiza por separado, tanto la preparación de la muestra como su análisis posterior. Además, para poder llevar a cabo la cuantificación del GABA libre se requiere la realización de una hidrólisis ácida previa que permita liberar el GABA unido a proteínas.

295 El estudio de la homocarnosina en LCR también es de utilidad ante una sospecha diagnóstica de un error congénito del metabolismo del GABA. Existen varias publicaciones en las que se describen diversas metodologías para su análisis: HPLC-FD (38) o HPLC de intercambio iónico acoplada a un detector ultravioleta (UV) (39), entre otras. En el
300 artículo de Jansen *et al.* (40) se describe una metodología para el análisis de la homocarnosina mediante LC-MS/MS. Esta técnica presenta ciertas ventajas respecto a las anteriores, entre las que destacan: reducción del tiempo de la carrera cromatográfica de las muestras e introducción de un estándar interno para su posterior
305 cuantificación.

ERRORES CONGÉNITOS DEL METABOLISMO DEL FOLATO

En esta revisión, nos centraremos en el análisis de la deficiencia de folato cerebral y en la malabsorción hereditaria de folato por su
310 afectación al sistema nervioso central y por la importancia del análisis de metabolitos presentes en LCR ante una sospecha diagnóstica.

En la tabla I se muestran las alteraciones de metabolitos en los errores congénitos del metabolismo del folato, su tipo de herencia y su número OMIM.

315 La deficiencia de folato cerebral se define como un síndrome que cursa con afectación del sistema nervioso central en el que se demuestra una disminución en la concentración de 5-MTHF en LCR, con concentraciones normales en sangre periférica (12,41). La deficiencia del receptor de folato de alta afinidad, encargado de
320 mediar el transporte de la molécula hacia el sistema nervioso central, constituye la forma congénita primaria.

Por otro lado, la malabsorción hereditaria de folato se produce ante una deficiencia del transportador de folato acoplado a protones, localizado en el intestino. Los pacientes afectados de esta patología
325 muestran unos niveles disminuidos de folato tanto en LCR como en sangre periférica (12).

Principales técnicas para el análisis de metabolitos presentes en LCR de pacientes con errores congénitos del metabolismo

330 **del folato**

En la determinación del 5-MTHF en LCR, ante una sospecha diagnóstica de una deficiencia cerebral de folato también se han descrito diversas metodologías, entre las que destacan: HPLC-ED, HPLC-FD (42) y LC-MS/MS con dilución isotópica (43). En la 335 publicación de Ormazábal *et al.* (44) se exponen los valores de referencia de 5-MTHF en LCR analizados mediante HPLC de fase reversa acoplada a FD. Por otro lado, en el artículo de Akiyama *et al.* (45) se propone el uso de la determinación del folato total presente 340 en LCR como prueba de cribado ante la sospecha de una deficiencia cerebral de folato. Se sugiere la realización de esta prueba de cribado debido al difícil acceso a la cuantificación de 5-MTHF en LCR en gran parte de los centros hospitalarios.

ERRORES CONGÉNITOS DEL METABOLISMO DE LA VITAMINA B₆

345 El piridoxal-5'-fosfato (PLP) es el metabolito biológicamente activo de la vitamina B₆. Se genera mediante reacciones de fosforilación y oxidación a partir de otros vitámeros precursores (piridoxina-5'-fosfato y piridoxamina-5'-fosfato). El PLP actúa como cofactor en múltiples reacciones enzimáticas esenciales en el sistema nervioso 350 central como: el metabolismo de la dopamina, serotonina, glutamato, GABA, glicina y D-serina (46).

En la tabla I se muestran las alteraciones de metabolitos en los errores congénitos del metabolismo de vitamina B₆, su tipo de herencia y su número OMIM. Por otro lado, en la figura 3 se 355 representan las principales rutas metabólicas implicadas en los errores congénitos del metabolismo de la vitamina B₆.

En este apartado nos centraremos en el déficit de la enzima piridox(am)ina-5'-fosfato oxidasa (PNPO) y en el déficit de antiquitina o α-aminoacético semialdehído (α-AASA) deshidrogenasa. Ambas 360 patologías cursan con convulsiones dependientes de determinados

metabolitos de la vitamina B₆. En el primer caso, los pacientes responden a la terapia con PLP y en el segundo, al tratamiento con piridoxina (12,47).

La PNPO es la enzima encargada de catalizar el paso de piridox(am)ina-5'-fosfato a PLP (48). Por ello, las convulsiones de los pacientes que presentan este déficit enzimático responden a la terapia con PLP. En el artículo de Mills *et al.* (49) se describen algunos casos de pacientes con este déficit en los que se observa una alteración de determinados metabolitos de las vías metabólicas en las que el PLP actúa como cofactor. Así, se demuestran disminuciones de HVA y 5-HIAA acompañadas de un aumento en las concentraciones de 3-OMD y 5-HTP en LCR. Además, se observa un incremento en la concentración de ácido vanil-láctico en orina, que también es de utilidad para el diagnóstico de la patología (13). Estas alteraciones se producen como consecuencia de una menor actividad enzimática de la AADC dependiente del cofactor. Por otro lado, se observa un aumento en las concentraciones de glicina y de treonina en LCR, igualmente explicado por una reducción de las actividades de determinadas enzimas implicadas en las vías de metabolización de la glicina y de la treonina que requieren el PLP como cofactor. Las concentraciones de taurina e histidina en LCR también están aumentadas respecto a los valores de los pacientes control y las concentraciones de β-alanina y PLP se encuentran disminuidas (48,50). La antiquitina o α-AASA deshidrogenasa es una enzima implicada en el metabolismo cerebral de la lisina (51) y su déficit constituye la causa más común de epilepsia dependiente de piridoxina. Su deficiencia genera una elevación de piperidina-6-carboxilato (P6C), α-AASA y ácido pipecólico (52). La P6C produce una reacción de condensación con el PLP que genera su inactivación (51). Así, se observa una disminución de PLP en LCR que, a su vez, provoca un descenso en la concentración de HVA, 5-HIAA, glicina y treonina, acompañado de un incremento en las concentraciones de 3-OMD (50). Los cambios en las concentraciones de estos metabolitos

también explican una disminución de la actividad de las enzimas
395 dependientes de PLP como cofactor.

Principales técnicas para el análisis de metabolitos presentes en LCR de pacientes con errores congénitos del metabolismo de la vitamina B₆

400 En la publicación de Bates *et al.* (53) se describe un protocolo para el análisis del PLP en plasma mediante HPLC de fase reversa acoplada a FD. En el artículo de Ormazábal *et al.* (54) se exponen los valores de referencia del cofactor enzimático PLP en LCR de pacientes pediátricos con deficiencia de PNPO analizados mediante HPLC de
405 fase reversa acoplada a FD. En la publicación de Van der Ham *et al.* (55) se refieren los valores de referencia de los vitámeros de la vitamina B₆ (piridoxal, piridoxina, piridoxamina y sus formas fosforiladas) en LCR mediante una metodología de LC-MS/MS con ionización positiva por electrospray y dilución isotópica validada por
410 el mismo grupo, en la que, además, se lleva a cabo una precipitación de las proteínas de la muestra con ácido tricloroacético. Unos años más tarde el mismo laboratorio proporcionó los valores de referencia en plasma y LCR de los vitámeros de la vitamina B₆ (piridoxal, piridoxina, piridoxamina y sus formas fosforiladas) en pacientes
415 pediátricos con discapacidad intelectual, asociada o no a epilepsia, cuantificados mediante cromatografía líquida de ultraalto rendimiento acoplada a espectrometría de masas (UHPLC-MS/MS) (46).

REQUERIMIENTOS PREANALÍTICOS PARA LA TOMA DE 420 MUESTRA DE LCR

Para el análisis de los metabolitos presentes en LCR de pacientes con sospecha de errores congénitos del metabolismo con expresión en el sistema nervioso central, en general, se recogen tres tubos numerados según el orden de extracción, que deben protegerse de la
425 luz. El primer tubo se utiliza para el análisis del HVA y del 5-HIAA. En el segundo tubo se determinan los niveles de PLP y de 5-MTHF. Por

último, el tercer tubo, que contiene 1,4-ditiotreitol (DTT) como agente reductor y ácido dietilentriaminopentacético (DTPA) como quelante de metales, se utiliza para llevar a cabo el análisis de las pterinas 430 (18,56). Las muestras deben centrifugarse justo después de su extracción y debe separarse el sobrenadante en otro tubo estéril para evitar la oxidación de determinados metabolitos por la presencia de eritrocitos (18). Estas muestras deben conservarse en hielo seco o -80 °C hasta su análisis. Este procedimiento es de gran relevancia en el 435 análisis de GABA libre y de determinados metabolitos de la vía de las pterinas por su alta termolabilidad (17,18,57).

TENDENCIA ACTUAL. ANÁLISIS DE PANELES DE METABOLITOS PRESENTES EN LCR PARA EL DIAGNÓSTICO DE PACIENTES CON 440 ERRORES CONGÉNITOS DEL METABOLISMO DE LOS NEUROTRANSMISORES

En dos publicaciones del año 2020, Galla *et al.* (25) y Klinke *et al.* (3), se propone el análisis simultáneo de 30 y de 38 metabolitos, respectivamente, en LCR ante una sospecha de un error congénito del 445 metabolismo que curse con síntomas neurológicos. El artículo de Galla *et al.* se centra en el análisis de los metabolitos que se encuentran alterados en los defectos del metabolismo de la tirosina y del triptófano, ya sea por defectos enzimáticos primarios o por déficit de sus cofactores. Además, también se cuantifican las pterinas, el 450 cortisol y la histamina tanto en suero como en LCR. El método, validado por la Agencia Europea del Medicamento, se basa en el análisis del panel de metabolitos en un mismo ensayo de 20 minutos mediante LC-MS/MS en una columna C18 de fase reversa con dilución isotópica. Tanto en la muestra de suero como en la muestra de LCR se 455 lleva a cabo un proceso de precipitación de las proteínas presentes en la muestra de forma previa a su análisis. Por otro lado, en la publicación de Klinke *et al.* se llevan a cabo dos ensayos distintos, ambos analizados mediante LC-MS/MS con una columna C18 de fase reversa con dilución isotópica. El primer ensayo incluye los

460 metabolitos relacionados con los errores congénitos del metabolismo de la tirosina y del triptófano, ya sea por defectos enzimáticos primarios o por déficit de sus cofactores, de la vitamina B₆, del folato o del resto de las pterinas. Por otra parte, el segundo ensayo se centra en el análisis de las purinas y de las pirimidinas, además del
465 guanidinoacetato.

Por último, es importante mencionar la publicación de Yan *et al.* (58), en la que se analiza un panel de 13 metabolitos relacionados con la inflamación. El ensayo se lleva a cabo en LCR mediante LC-MS/MS en una columna C18 con dilución isotópica y permite cuantificar
470 metabolitos que forman parte de la vía de las pterinas, triptófano-quinurenina y óxido nítrico.

CONCLUSIONES

En este artículo de revisión se demuestra la utilidad del estudio de
475 metabolitos en LCR mediante espectrometría de masas en tandem para el diagnóstico de las enfermedades hereditarias del metabolismo de los neurotransmisores. Además, se pone de manifiesto la tendencia al análisis simultáneo de múltiples metabolitos con el objetivo de reducir el tiempo para obtener un diagnóstico, optimizar
480 el uso de la muestra de LCR y disminuir los tiempos de respuesta del laboratorio para el análisis de los metabolitos y de la emisión del correspondiente informe. Finalmente, cabe destacar la importancia de llevar a cabo estudios moleculares después de haber realizado el diagnóstico bioquímico para poder ofrecer consejo genético al
485 paciente y su familia, y en el caso de que sea posible, orientar respecto al pronóstico o al tratamiento de la patología.

Agradecimientos

Beca de rotación nacional 2021 concedida por la Asociación Española
490 del Laboratorio Clínico.

BIBLIOGRAFÍA

1. Prasad C, Galbraith PA, Sir Archibald Garrod and alkaptonuria-'Story of metabolic genetics'. *Clin Genet* 2005;68(3):199-203.
2. Mussap M, Zaffanello M, Fanos V. Metabolomics: a challenge for detecting and monitoring inborn errors of metabolism. *Ann Transl Med* 2018;6(17):338.
3. Klinke G, Richter S, Monostori P, Schmidt-Mader B, García-Cazorla A, Artuch R, et al. Targeted cerebrospinal fluid analysis for inborn errors of metabolism on an LC-MS/MS analysis platform. *J Inherit Metab Dis* 2020;43(4):712-25.
4. Coene KLM, Kluijtmans LAJ, van der Heeft E, Engelke UFH, de Boer S, Hoegen B, et al. Next-generation metabolic screening: targeted and untargeted metabolomics for the diagnosis of inborn errors of metabolism in individual patients. *J Inherit Metab Dis* 2018;41(3):337-53.
5. Wishart DS, Guo AC, Oler E, Wang F, Anjum A, Peters H, et al. HMDB 5.0: The Human Metabolome Database for 2022. *Nucleic Acids Res* 2022;50(D1):D622-31.
6. Saudubray JM, García-Cazorla À. An overview of inborn errors of metabolism affecting the brain: from neurodevelopment to neurodegenerative disorders. *Dialogues Clin Neurosci* 2018;20(4):301-25.
- 515 7. Pearl PL, Capp PK, Novotny EJ, Gibson KM. Inherited disorders of neurotransmitters in children and adults. *Clin Biochem* 2005;38(12):1051-8.
8. Opladen T, Cortès-Saladelafont E, Mastrangelo M, Horvath G, Pons R, López-Laso E, et al. The International Working Group on 520 Neurotransmitter related Disorders (iNTD): A worldwide research project focused on primary and secondary neurotransmitter disorders. *Mol Genet Metab Reports* 2016;9:61-6.
9. Szymańska K, Kuśmierska K, Demkow U. Inherited disorders of brain neurotransmitters: Pathogenesis and diagnostic approach. *Adv Exp Med Biol* 2015;837:1-8.

10. Guibal P, Lo A, Maitre P, Moussa F. Pterin determination in cerebrospinal fluid: State of the art. *Pteridines* 2017;28(2):83-9.
11. Brennenstuhl H, Jung-Klawitter S, Assmann B, Opladen T. Inherited Disorders of Neurotransmitters: Classification and Practical
- 530 Approaches for Diagnosis and Treatment. *Neuropediatrics* 2019;50(1):2-14.
12. Couce ML, Aldámiz-Echevarría L, García-Jiménez MC, González-Lamuño D. Diagnóstico y tratamiento de las enfermedades metabólicas hereditarias; 2022.
- 535 13. Ruiz A, García-Villoria J, Ormazábal A, Zschocke J, Fiol M, Navarro-Sastre A, et al. A new fatal case of pyridox(am)ine 5'-phosphate oxidase (PNPO) deficiency. *Mol Genet Metab* 2008;93(2):216-8.
14. Wassenberg T, Geurtz BPH, Monnens L, Wevers RA, Willemsen
- 540 MA, Verbeek MM. Blood, urine and cerebrospinal fluid analysis in TH and AADC deficiency and the effect of treatment. *Mol Genet Metab Reports* 2021;27:100762.
15. Opladen T, López-Laso E, Cortès-Saladelafont E, Pearson TS, Sivri HS, Yıldız Y, et al. Consensus guideline for the diagnosis and
- 545 treatment of tetrahydrobiopterin (BH4) deficiencies. *Orphanet J Rare Dis* 2020;15(1):126.
16. Longo N. Disorders of biopterin metabolism. *J Inherit Metab Dis* 2009;32(3):333-42.
17. Kurian MA, Gissen P, Smith M, Heales SJR, Clayton PT. The
- 550 monoamine neurotransmitter disorders: An expanding range of neurological syndromes. *Lancet Neurol* 2011;10(8):721-33.
18. Ng J, Papandreou A, Heales SJ, Kurian MA. Monoamine neurotransmitter disorders - Clinical advances and future perspectives. *Nat Rev Neurol* 2015;11(10):567-84.
- 555 19. Opladen T, Hoffmann GF, Blau N. An international survey of patients with tetrahydrobiopterin deficiencies presenting with hyperphenylalaninaemia. *J Inherit Metab Dis* 2012;35(6):963-73.
20. Steinberg D, Blau N, Gorionov D, Bitsch J, Zuker M, Humel S, et

- al. Heterozygous mutation in 5'-untranslated region of sepiapterin
560 reductase gene (SPR) in a patient with dopa-responsive dystonia.
Neurogenetics 2004;5:187-90.
21. Mena MA, Aguado EG, de Yebenes JG. Monoamine metabolites in
human cerebrospinal fluid. HPLC/ED method. *Acta Neurol Scand*
1984;69(4):218-25.
- 565 22. Ormazábal A, García-Cazorla A, Fernández Y, Fernández-Álvarez
E, Campistol J, Artuch R. HPLC with electrochemical and fluorescence
detection procedures for the diagnosis of inborn errors of biogenic
amines and pterins. *J Neurosci Methods* 2005;142(1):153-8.
- 570 23. Cox JM, Butler JP, Lutzke BS, Jones BA, Buckholz JE, Biondolillo R,
et al. A validated LC-MS/MS method for neurotransmitter metabolite
analysis in human cerebrospinal fluid using benzoyl chloride
derivatization. *Bioanalysis* 2015;7(19):2461-75.
- 575 24. Tufi S, Lamoree M, de Boer J, Leonards P. Simultaneous analysis
of multiple neurotransmitters by hydrophilic interaction liquid
chromatography coupled to tandem mass spectrometry. *J Chromatogr*
A 2015;1395:79-87.
25. Galla Z, Rajda C, Rácz G, Grecsó N, Baráth Á, Vécsei L, et al.
Simultaneous determination of 30 neurologically and metabolically
important molecules: A sensitive and selective way to measure
580 tyrosine and tryptophan pathway metabolites and other biomarkers in
human serum and cerebrospinal fluid. *J Chromatogr A*
2021;1635:461775.
26. Marcos J, Renau N, Valverde O, Aznar-Laín G, Gracia-Rubio I,
González-Sepúlveda M, et al. Targeting tryptophan and tyrosine
585 metabolism by liquid chromatography tandem mass spectrometry. *J*
Chromatogr A 2016;1434:91-101.
27. Fuertig R, Ceci A, Camus SM, Bezard E, Luippold AH, Hengerer B.
LC-MS/MS-based quantification of kynurenone metabolites,
tryptophan, monoamines and neopterin in plasma, cerebrospinal fluid
590 and brain. *Bioanalysis* 2016;8(18):1903-17.
28. Fukushima T, Nixon JC. Analysis of reduced forms of biopterin in

- biological tissues and fluids. *Anal Biochem* 1980;102(1):176-88.
29. Hyland K. Estimation of tetrahydro, dihydro and fully oxidised pterins by high-performance liquid chromatography using sequential 595 electrochemical and fluorometric detection. *J Chromatogr B Biomed Sci Appl* 1985;343(1):35-41.
30. Arning E, Bottiglieri T. LC-MS/MS Analysis of Cerebrospinal Fluid Metabolites in the Pterin Biosynthetic Pathway. *JIMD Rep* 2016;29:1-9.
31. Parviz M, Vogel K, Gibson K, Pearl P. Disorders of GABA 600 metabolism: SSADH and GABA-transaminase deficiencies. *J Pediatr Epilepsy* 2014;3(4):217-27.
32. Kennedy AD, Pappan KL, Donti T, Delgado MR, Shinawi M, Pearson TS, et al. 2-Pyrrolidinone and succinimide as clinical screening biomarkers for gaba-transaminase deficiency: Anti-seizure 605 medications impact accurate diagnosis. *Front Neurosci* 2019;13:394.
33. Jaeken J, Casaer P, de Cock P, Corbeel L, Eeckels R, Eggermont E. Gamma-aminobutyric acid-transaminase deficiency: a newly recognized inborn error of neurotransmitter metabolism. *Neuropediatrics* 1984;15(3):165-9.
- 610 34. Pearl PL, Shukla L, Theodore WH, Jakobs C, Gibson KM. Epilepsy in succinic semialdehyde dehydrogenase deficiency, a disorder of GABA metabolism. *Brain Dev* 2011;33(9):796-805.
35. Goldsmith RF, Earl JW, Cunningham AM. Determination of gamma-aminobutyric acid and other amino acids in cerebrospinal 615 fluid of pediatric patients by reversed-phase liquid chromatography. *Clin Chem* 1987;33(10):1736-40.
36. Naini AB, Vontzalidou E, Côté LJ. Isocratic HPLC Assay with Electrochemical Detection of Free gamma-aminobutyric Acid in Cerebrospinal Fluid. *Clin Chem* 1993;39(2):247-50.
- 620 37. Arning E, Bottiglieri T. Quantification of γ -aminobutyric acid in cerebrospinal fluid using liquid chromatography-electrospray tandem mass spectrometry. *Methods Mol Biol* 2016;1378:109-18.
38. Dunnett M, Harris RC. High-performance liquid chromatographic determination of imidazole dipeptides, histidine, 1-methylhistidine

- 625 and 3-methylhistidine in equine and camel muscle and individual
muscle fibres. *J Chromatogr B Biomed Appl* 1997;688(1):47-55.
39. Yokoyama Y, Horikoshi S, Takahashi T, Sato H. Low-capacity
cation-exchange chromatography of ultraviolet-absorbing urinary
basic metabolites using a reversed-phase column coated with
630 hexadecylsulfonate. *J Chromatogr A* 2000;886(1-2):297-302.
40. Jansen EEW, Gibson KM, Shigematsu Y, Jakobs C, Verhoeven NM.
A novel, quantitative assay for homocarnosine in cerebrospinal fluid
using stable-isotope dilution liquid chromatography-tandem mass
spectrometry. *J Chromatogr B Anal Technol Biomed Life Sci*
635 2006;830(2):196-200.
41. Ramaekers VT, Paediatric D. Cerebral folate deficiency.
Neurology 2004;46(12):843-51.
42. Chládek J, Šišpera L, Martíková J. High-performance liquid
chromatographic assay for the determination of 5-
640 methyltetrahydrofolate in human plasma. *J Chromatogr B Biomed Sci Appl* 2000;744(2):307-13.
43. Arning E, Bottiglieri T. Quantitation of 5-methyltetrahydrofolate
in cerebrospinal fluid using liquid chromatography-electrospray
tandem mass spectrometry. *Methods Mol Biol* 2016;1378:175-82.
- 645 44. Ormazábal A, García-Cazorla A, Pérez-Dueñas B, González V,
Fernández-Álvarez E, Pineda M, et al. Determination of 5-
methyltetrahydrofolate in cerebrospinal fluid of paediatric patients:
Reference values for a paediatric population. *Clin Chim Acta*
2006;371(1-2):159-62.
- 650 45. Akiyama T, Tada H, Shiokawa T, Kobayashi K, Yoshinaga H. Total
folate and 5-methyltetrahydrofolate in the cerebrospinal fluid of
children: correlation and reference values. *Clin Chem Lab Med*
2015;53(12):2009-14.
46. Albersen M, Bosma M, Jans JJM, Hofstede FC, van Hasselt PM, de
655 Sain-van der Velden MGM, et al. Vitamin B6 in plasma and
cerebrospinal fluid of children. *PLoS One*. 2015;10(3):e0120972.
47. Wilson MP, Plecko B, Mills PB, Clayton PT. Disorders affecting

- vitamin B6 metabolism. *J Inherit Metab Dis* 2019;42(4):629-46.
48. Clayton PT. B6-responsive disorders: A model of vitamin dependency. *J Inherit Metab Dis* 2006;29(2-3):317-26.
- 660 49. Mills PB, Surtees RAH, Champion MP, Beesley CE, Dalton N, Scamber PJ, et al. Neonatal epileptic encephalopathy caused by mutations in the PNPO gene encoding pyridox(am)ine 5'-phosphate oxidase. *Hum Mol Genet* 2005;14(8):1077-86.
- 665 50. Rahman S, Footitt EJ, Varadkar S, Clayton PT. Inborn errors of metabolism causing epilepsy. *Dev Med Child Neurol* 2013;55(1):23-36.
51. Mills PB, Struys E, Jakobs C, Plecko B, Baxter P, Baumgartner M, et al. Mutations in antiquitin in individuals with pyridoxine-dependent seizures. *Nat Med* 2006;12(3):307-9.
- 670 52. Sharma S, Prasad AN. Inborn errors of metabolism and epilepsy: Current understanding, diagnosis, and treatment approaches. *Int J Mol Sci* 2017;18(7):1384.
53. Bates CJ, Pentieva KD, Matthews N, Macdonald A. A simple, sensitive and reproducible assay for pyridoxal 5'-phosphate and 4-675 pyridoxic acid in human plasma. *Clin Chim Acta* 1999;280(1-2):101-11.
54. Ormazábal A, Oppenheim M, Serrano M, García-Cazorla A, Campistol J, Ribes A, et al. Pyridoxal 5'-phosphate values in cerebrospinal fluid: Reference values and diagnosis of PNPO 680 deficiency in paediatric patients. *Mol Genet Metab* 2008;94(2):173-7.
55. Van der Ham M, Albersen M, de Koning TJ, Visser G, Middendorp A, Bosma M, et al. Quantification of vitamin B6 vitamers in human cerebrospinal fluid by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Anal Chim Acta* 2012;712:108-14.
- 685 56. Hyland K, Surtees RAH, Heales SJR, Bowron A, Howells DW, Smith I. Cerebrospinal fluid concentrations of pterins and metabolites of serotonin and dopamine in a pediatric reference population. *Pediatr Res* 1993;34(1):10-4.
57. Assmann B, Surtees R, Hoffmann GF. Approach to the diagnosis 690 of neurotransmitter diseases exemplified by the differential diagnosis

- of childhood-onset dystonia. Ann Neurol 2003;54(Suppl.6):S18-24.
58. Yan J, Han V, Heng B, Guillemin G, Bandodkar S, Dale R. Development of a translational inflammation panel for the quantification of cerebrospinal fluid Pterin, Tryptophan-Kynurenine and
- 695 Nitric oxide pathway metabolites. eBioMedicine 2022;77:103917.

Tabla I. Alteraciones de metabolitos en LCR y orina de los errores congénitos del metabolismo de las aminas biógenas, GABA, folato y vitamina B₆, tipo de herencia y número OMIM de las entidades

	Patología	Núm ero OMIM	Tipo de heren cia	Metabolitos alterados en LCR	Metabolit os alterados en orina
Errores congénito s del metabolis mo de las aminas biógenas	Deficiencia de TH	60540 7	AR	↓ HVA, MHPG	
	Deficiencia de AADC	60864 3	AR	↓ ↓ HVA, 5-HIAA ↑ ↑ 3-OMD, 5-HTP	↑ Ácido vanil-láctico, 3-OMD
	Deficiencia de GTPCH I	23391 0	AR	↓ HVA, 5-HIAA	↓ BP, NP
	Deficiencia de PTPS	26164 0	AR	↓ HVA, 5-HIAA, BP ↑ NP	↓ BP ↑ NP
	Deficiencia de PCD	26407 0	AR	No se observan alteraciones	↓ BP
	Deficiencia de DHPR	26163 0	AR	↓ HVA, 5-HIAA, 5-MTHF ↑ BP	↓ BP
	Deficiencia de GTPCH I	12823 0	AD, AR	↓ HVA, 5-HIAA, NP, BP y BH ₄	
	Deficiencia de SPR	61271 6	AD, AR	↓ HVA, 5-HIAA, BH ₄ ↑ SP, BP, BH ₂	↑ SP
Errores	Deficiencia	61316	AR	↑ GABA, β-	

congénito s del metabolis mo del GABA	de GABA-T	3		alanina	
	Deficiencia de SSADH	27198 0	AR	↑ GABA, GHB, homocarnosina, carnosina	↑↑ GHB
Errores congénito s del metabolis mo del folato	Deficiencia de folato cerebral	61306 8	AR	↓ 5-MTHF	
	Malabsorción hereditaria de folato	22905 0	AR	↓ 5-MTHF	
Errores congénito s del metabolis mo de la vitamina B₆	Deficiencia de PNPO	61009 0	AR	↓ HVA, 5-HIAA ↑ 3-OMD, 5-HTP, glicina, treonina, histidina, taurina ↓ β-alanina, PLP	↑ Ácido vanil-láctico, 3-OMD
	Deficiencia de antiquitina o α-AASA deshidrogenasa	26610 0	AR	↑ P6C, α-AASA, ácido pipecólico, 3-OMD ↓ PLP, HVA, 5-HIAA, glicina, treonina	

700 ↑: valores aumentados en comparación los valores de referencia de edad; ↓: valores disminuidos en comparación los valores de referencia de edad; AR: autosómica recesiva; AD: autosómica dominante; LCR: líquido cefalorraquídeo; TH: tirosina hidroxilasa; HVA: ácido homovanílico; MHPG: 3-metoxi-4-hidroxifenilglicol; AADC: 705 carboxilasa de los aminoácidos aromáticos; 5-HIAA: ácido 5-hidroxiindolacético; 3-OMD: 3-O-metildopa; GTPCH I: guanosina-5'-trifosfato ciclohidrolasa I; 5-HTP: 5-hidroxitriptófano; BP: biopterina; NP: neopterina; PTPS: 6-piruvicotetrahidropterina sintasa; PCD: pterina-4α-carbaminolamina dehidratasa; DHPR: dihidropterina

710 reductasa; 5-MTHF: 5-metiltetrahidrofolato; BH₄: tetrahidrobiopterina;
SPR: sepiapterina reductasa; SP: sepiapterina; BH₂: 7,8-
dihidrobiopterina; GABA: ácido γ -aminobutírico; GABA-T: GABA
trasnsaminasa; SSADH: succinato semialdehído deshidrogenasa; GHB:
 γ -hidroxibutírico; PNPO: piridox(am)ina-5'-fosfato oxidasa; PLP:
715 piridoxal-5'-fosfato; α -AASA: α -aminoadípico semialdehído; P6C:
piperidina-6-carboxilato.

