

Estudio morfofuncional de una plastia electroestimulada del músculo *latissimus dorsi* para sustitución diafragmática*

J.L. Alonso Calderón

Servicio de Cirugía Pediátrica. Hospital Niño Jesús. Madrid.

RESUMEN: Basándonos en las aplicaciones prácticas del músculo *latissimus dorsi* (MLD) o dorsal ancho tanto en reconstrucción de defectos toracoabdominales como funcionalmente en la cardiomioplastia, y en nuestra experiencia en la electroestimulación con marcapasos diafragmático, elaboramos el objetivo principal de este trabajo consistente en la creación de una plastia funcional muscular de MLD para sustitución del diafragma. En dos grupos de gatos de 6 animales cada uno, con sección del nervio frénico correspondiente, se ha practicado una plastia de MLD para sustituir a un hemidiafragma, conservando el pedículo tóraco dorsal, en un grupo por vía torácica (plastia intratorácica) y en el otro por vía abdominal (plastia intraabdominal). Posteriormente en una segunda intervención implantamos el electrodo estimulador sobre el pedículo toracodorsal y el resto de componentes del marcapasos diafragmático en un bolsillo subcutáneo. Durante un mes se realiza, de forma progresiva, electroestimulación de la plastia de MLD, llevando a cabo evaluación radiológica y espirométrica, que se compara con evaluaciones control practicadas antes de realizar la plastia. Después del sacrificio de los animales se practica valoración planimétrica e histológica del diafragma extirpado. Los resultados morfológicos y funcionales obtenidos nos permiten afirmar que la plastia funcional de MLD es un sustituto diafragmático efectivo, aunque con un menor grado de función que el diafragma original, y funcionalmente la plastia intraabdominal ha resultado superior a la plastia intratorácica.

PALABRAS CLAVE: Plastia muscular funcional; Músculo dorsal ancho; Electroestimulación; Marcapasos diafragmático.

MORPHO-FUNCTIONAL STUDY OF ELECTROSTIMULATED LATISSIMUS DORSI MUSCLE FLAP FOR DIAPHRAGM SUSTITUTION

ABSTRACT: Based on practical applications of the muscle *latissimus dorsi* (MLD) as much in reconstruction thoracic-abdominal defects as functionally in cardiomyoplasty, and in our experience in the electrostimulation with diaphragm pacing, we elaborated the primary objective of this work consisting of the creation of functional muscle plasty of MLD for substitution of the diaphragm. In two groups of cats formed by 6 animals each one, with section of the corresponding phrenic nerve, MLD

plasty has been done to replace hemidiaaphragm, conserving the thoracodorsal pedicle, by thoracic route in a group (intrathoracic plasty), and in the other by abdominal route (intraabdominal plasty). In a second intervention the stimulator electrode is implanted on thoracodorsal pedicle and the rest of components of the diaphragmatic pacing in a subcutaneous pocket. During a month progressive electrostimulation of MLD plasty is made, carrying out radiological and spirometric evaluation, that compares with evaluation control made before making plasty. After the sacrifice of the animals planimetric and histologic evaluation of the extirpated diaphragm were performed. Morphologic and functional results obtained allow us to affirm that functional plasty of MLD is an effective diaphragmatic substitute, although with a smaller degree of function than the original diaphragm, and functionally intraabdominal plasty has been superior to intratorácica plasty.

KEY WORDS: Functional muscle plasty; Latissimus dorsi muscle; Electrostimulation; Diaphragm pacing.

INTRODUCCIÓN

Las aplicaciones prácticas de la plastia del músculo *latissimus dorsi* o dorsal ancho (MLD) son actualmente muy conocidas, habiéndose utilizado en la reparación de defectos de la pared torácica o abdominal por diversas etiologías como: fístulas broncopleurales crónicas, volet torácico, reconstrucción mamaria tras cirugía neoplásica^(1,2), reparación de defectos traumáticos o bien para subsanar defectos congénitos (síndrome de Poland, agenesia diafragmática, etc.)⁽³⁾. En los últimos años han aparecido comunicaciones que justifican y animan al empleo de la plastia del MLD para sustitución en niños del hemidiafragma ausente en agenesia diafragmática, así como para la reparación de hernias diafragmáticas recurrentes cuya reparación inicial se llevó a cabo con distintos materiales (parches de dura, sintéticos, etc.)^(4,5,6).

Los defectos diafragmáticos amplios que no son susceptibles de reaproximación directa, reparados con parches de material sintético^(7,8), no experimentan un crecimiento correlativo con el del individuo, lo que conduce a que en

Correspondencia: Dr. J.L. Alonso Calderón. Servicio de Cirugía Pediátrica. Hospital Niño Jesús. Avda. Menéndez Pelayo 65, 28009 Madrid.

*Premio de la Sociedad Española de Cirugía Pediátrica 2005.

Recibido: Octubre 2005

Aceptado: Noviembre 2005

más del 80% de los casos se produzca una recurrencia de la patología inicial, y en muchos casos en un período de tiempo inferior a los 2 años. Además producen una tracción sobre la pared torácica que dificulta su desarrollo y en ocasiones produce algún grado de alteración respiratoria restrictiva. Los parches de dura, aunque con muy baja incidencia, conllevan el riesgo adicional de posible transmisión vírica sobre el individuo receptor. Todo ello ha conducido a inclinarse en estos casos por reconstrucción con tejidos vivos del propio individuo, que alteren mínimamente la anatomía, eviten la recurrencia y experimenten crecimiento correlativo al del paciente. Actualmente, el flap o plastia del MLD es sin duda el más empleado en la reparación de los defectos que hemos señalado.

Algunos autores han llegado más allá y en un intento de evitar la atrofia muscular subsiguiente a la denervación por pérdida de trofismo del MLD han realizado neuroanastomosis entre el nervio toracodorsal seccionado del MLD utilizado en la reparación y el nervio frénico ipsilateral, refiriendo que han apreciado motilidad del neodiafragma reconstruido, aunque esto último no se encuentra bien documentado^(3,6,9).

El MLD también ha sido empleado funcionalmente con éxito en cardiomioplastia para reforzar la función de un ventrículo insuficiente, y mediante electroestimulación el MLD es capaz de transformarse en un músculo resistente a la fatiga, cambiando la proporción de sus fibras tras un período de condicionamiento⁽¹⁰⁻¹⁵⁾. Durante la electroestimulación muscular aparece el fenómeno de la fatiga muscular, como expresión de la desaparición de la respuesta contráctil del músculo esquelético a un sobreesfuerzo^(16,17), que aparece más rápidamente si la estimulación es muscular y más tardíamente si se estimula el nervio motor. Sin embargo, si la electroestimulación del nervio motor se realiza a frecuencias inferiores a las de fusión muscular, la fatiga se retrasa notablemente. En esta última observación se basa en que tras un período de estimulación a frecuencias inferiores a las de fusión (período de condicionamiento) se consiga una transformación del tipo de fibras musculares, en virtud del cual dicho músculo incrementa el número de fibras tipo I o de contracción lenta que son resistentes a la fatiga muscular⁽¹⁵⁻²⁶⁾. Nuestra experiencia en este campo se ha desarrollado debido al uso de marcapasos diafragmáticos, sobre todo en pacientes con traumatismos medulares, con lesión de la motoneurona espinal, que son sometidos a electroestimulación y a períodos de condicionamiento para conseguir ventilación electrofrénica^(18,27-29).

Estos antecedentes nos condujeron a plantearnos la posibilidad de crear una plastia funcional (electroestimulada) del MLD para sustituir al hemidiafragma ausente o sin función, de aplicación práctica en las parálisis diafragmáticas debidas a lesiones por debajo de la motoneurona espinal y a defectos congénitos primarios (agenesias) o secundarios (hernias recurrentes).



Figura 1. MLD (músculo *latissimus dorsi*) del gato.

MATERIAL Y MÉTODOS

Animal de experimentación

El gato común el MLD se origina en la aponeurosis lumbar (Fig. 1) y aunque su porción lumboesquelética es de tipo fibroso, su extremo dorsohumeral es un músculo bien constituido, que resulta adecuado para este tipo de plastia. Sin embargo, este mamífero doméstico presenta inconvenientes de manejo postintervención, por su desconfianza, agresividad, inquietud y capacidad y habilidad para destruir el mecanismo implantado para electroestimulación. A pesar de todo, por su fácil disponibilidad, idoneidad del MLD para practicar la plastia y resistencia física, fue elegido como animal de experimentación. Todos los animales han recibido cuidados con arreglo a los principios de la «Guide for the care and use of laboratory animals», de la «Office of Science and Health Reports» (Bethesda, 1980).

MLD (músculo *latissimus dorsi*)

En el gato común, como en muchos mamíferos, el MLD forma parte de la musculatura dorsal emigrada y presenta algunas diferencias con el humano, sobre todo en su porción inferior o lumboesquelética donde es una fascia sin fibras musculares (Fig. 1), mientras que en su porción superior o humeral es un músculo mejor desarrollado que el humano, sin apenas fascia en su cara medial. Su ubicación es más superficial debido a la escasez de tejido celular subcutáneo del gato, mostrando sin embargo una vascularización e innervación similar a la del hombre. Innervado por una rama del plexo braquial, el nervio toracodorsal que nace en posición retroarterial y sigue un trayecto descendente oblicuo y externo hasta alcanzar el músculo, acompañado de los vasos toracodorsales o pedículo superior dominante, rama de la arteria subescapular, y que penetra en el músculo a escasa distancia de su inserción humeral. Además, el MLD se encuentra vascularizado en su extremo inferior por pedículos provenientes de las arterias intercostales distales y lumbares a través de arterias per-

forantes musculocutáneas. Esta vascularización polar independiente en su origen permite que este músculo muestre una extraordinaria adaptabilidad y versatilidad que posibilita su empleo en plásticas vascularizadas, óptimas en la reconstrucción de la caja torácica y la parte superior del abdomen.

Diseño experimental

Antes de establecer el tipo de plastia electroestimulada de MLD que se desarrollaría en este estudio, se efectuaron una serie de fases previas hasta conseguir el diseño definitivo de la plastia electroestimulada de MLD en dos grupos de animales. En ambos se realizan dos intervenciones quirúrgicas con un mes de separación entre ambas:

- **Grupo 1:**
 - *1ª intervención.* Toracotomía con sección del nervio frénico ipsilateral y plastia de MLD intratorácica (supradiafragmática).
 - *2ª intervención.* Implante del electrodo estimulador sobre el pedículo toracodorsal y ubicación del marcapasos.
- **Grupo 2:**
 - *1ª intervención.* Toracotomía con sección del nervio frénico ipsilateral y laparotomía con plastia de MLD intraabdominal (infradiafragmática).
 - *2ª intervención.* Implante del electrodo estimulador sobre el pedículo toracodorsal y ubicación del marcapasos.

Cada grupo de experimentación está formado por seis gatos, teniendo en cuenta que el grupo 1 inicialmente estaba formado por n=8 falleciendo dos, y el grupo 2 de n=7 habiendo fallecido 1.

Todos los animales de ambos grupos fueron sometidos a electroestimulación durante 1 mes, con un ritmo creciente y progresivo (condicionamiento), sin superar las frecuencias de fusión, mediante una antena de radiofrecuencia.

En ambos se han practicado estudios radiológicos y funcionales (espirométricos) antes del implante y después del implante con electroestimulación; también tras el sacrificio de los animales se han llevado a cabo estudios planimétricos e histológicos del hemidiafragma y de la plastia.

Anestesia

Con los animales en ayunas de 8 horas se procede a sedarlos con ketamina a dosis de 1-2 mg/kg intramuscular, y tras unos veinte minutos se extraen de la jaula y se trasladan a la mesa de quirófano. Después se monitoriza al animal con control de ECG, temperatura, pulsioxímetro y tensión arterial, y se canaliza una vía periférica, generalmente en los miembros, que permite la administración de fluidos y su anestesia utilizando tiopental sódico a 3 mg/kg IV en la inducción. Tras la administración de succinilcolina a 1 mg/kg IV mediante laringoscopia directa, se lleva a cabo la intubación endotraqueal con un tubo tutorizado con fiador flexible debido a la baja implantación glótica en el gato. Una

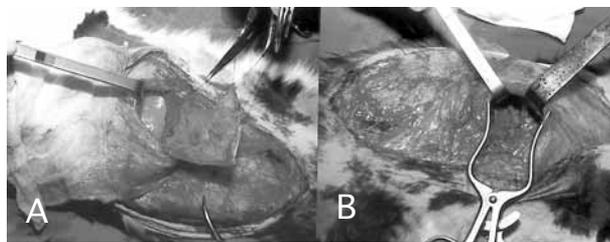


Figura 2. A) MLD desinsertado y preparado para la plastia y toracotomía para ubicación de la plastia de MLD intratorácica. B) Laparotomía con ubicación de la plastia de MLD intraabdominal.

vez que el animal se recupera tras la administración de succinilcolina y en ventilación espontánea, se lleva a cabo la valoración funcional de los volúmenes pulmonares conectando el espirómetro digital al extremo externo del tubo endotraqueal. Después el mantenimiento anestésico se realiza por anestesia general balanceada (neuroleptoanestesia tipo II), con mezcla de gases O₂/N₂O al 50% y añadiendo isoflurane al 0,5% en volumen. Se mantiene analgesia administrando fentanilo IV a 1 µg/kg cada 30 min y relajación neuromuscular con vecuronio IV a dosis de inicio de 0,08 mg/kg y dosis de rescate de 0,01 mg/kg cada 20 o 30 min. Durante todo el procedimiento quirúrgico se conecta el tubo endotraqueal a ventilación mecánica. En el acto quirúrgico en el que se procede a la valoración funcional de la plastia de MLD, se deja al animal en apnea mediante administración de succinilcolina IV, y se procede a la electroestimulación, registrando los volúmenes movilizados mediante la conexión del espirómetro digital al extremo externo del tubo endotraqueal.

Intervenciones quirúrgicas

Plastia intratorácica de MLD y sección frénica

Con el gato en posición de decúbito lateral derecho se practica incisión cutánea oblicua a nivel toracoabdominal, a la altura media del 5º o 6º espacio intercostal, que se prolonga hacia el dorso, y con disección amplia del escaso tejido celular subcutáneo se accede a la porción lumboesquelética (de tipo fascial) del MLD desinsertándola, lo que permite la rotación del mismo. Después se accede a su porción humeral desinsertándola y procurando no dañar el pedículo toracodorsal. Posteriormente se realiza toracotomía por 8º o 9º espacio intercostal izquierdo con sección del nervio frénico ipsilateral en su entrada en el hemidiafragma izquierdo, introduciendo la plastia del MLD en el interior del hemitórax (Fig. 2A), recubriendo y suturándola al hemidiafragma por su cara superior o torácica en la mayor extensión que sea posible. Se coloca un tubo de drenaje torácico y se cierra la toracotomía.

Plastia intraabdominal de MLD y sección frénica

Con el gato en posición de decúbito lateral derecho se practica incisión cutánea oblicua a nivel toracoabdominal, a

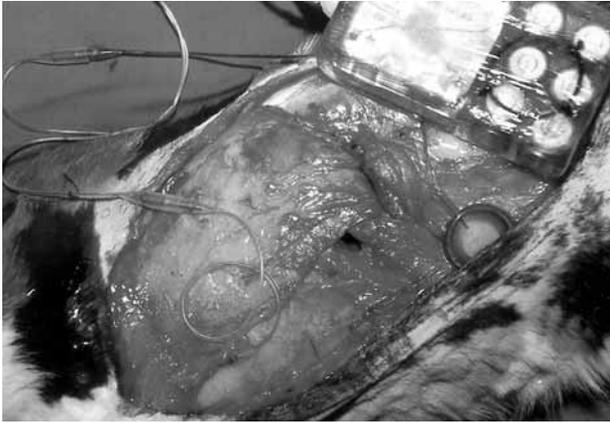


Figura 3. Implantación del electrodo estimulador sobre el nervio toracodorsal y del marcapasos, con prueba de estimulación antes de ubicarlo subcutáneamente.

la altura media del 7° espacio intercostal, que se prolonga hacia el dorso, y con disección amplia del escaso tejido celular subcutáneo se accede a la porción lumboesquelética (de tipo fascial) del MLD desinsertándola. Al igual que en la anterior se accede a la porción humeral y se desinserta el tendón humeral no lesionando el pedículo toracodorsal. Se practica una minitoracotomía a través del 6ª espacio intercostal y se realiza la sección del nervio frénico, se deja un tubo de drenaje torácico y se cierra. En el hipocondrio izquierdo y por laparotomía anterolateral (Fig. 2B) se accede a la cara inferior del hemidiafragma izquierdo, se introduce la plastia de MLD y se recubre la mayor superficie posible del hemidiafragma, cerrando después la pared abdominal.

Implantación del electrodo estimulador y del marcapasos

En posición de decúbito lateral derecho con extensión del miembro superior izquierdo del gato se practica incisión cutánea a nivel del borde posterior de la axila, y por disección se alcanza el extremo humeral del MLD identificando el pedículo vasculo-nervioso tóraco-dorsal. Colocamos el electrodo estimulador de forma que el nervio descansa sobre la lámina semicircular de platino del electrodo y le fijamos a los tejidos circundantes para evitar su desplazamiento (Fig. 3). Después labramos un bolsillo subcutáneo en el dorso del gato que nos permita ubicar el marcapasos, el electrodo neutro y las conexiones, fijándolas de la mejor forma posible para evitar movilidad del mismo (Fig. 4). En todas las intervenciones quirúrgicas se han utilizado materiales de sutura habituales: seda, vicryl, etc.; se ha efectuado profilaxis antibiótica con Cefoxitina a 50 mg/kg, y se ha empleado povidona iodada para desinfección cutánea de campos.

Electroestimulación

Se practica con un marcapasos diafragmático standard utilizado en experimentación, que consta fundamentalmente de un dispositivo implantado y otro externo:

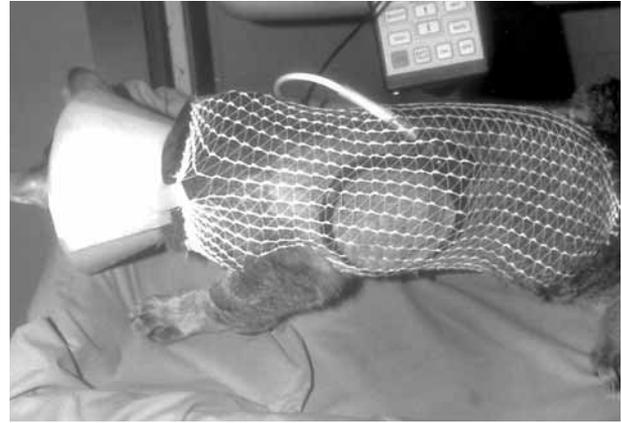


Figura 4. Electroestimulación postoperatoria por medio de antena de radiofrecuencia sobre el marcapasos diafragmático de implantación subcutánea.

Dispositivo implantado

Es un circuito electrónico alimentado por seis pilas de mercurio recubierto de teflón con dimensiones 10×8×2×cm (Fig. 3). Posee dos conexiones para entrada de dos cables con recubrimiento siliconado que conectan con el electrodo estimulador (cátodo) o activo, que consiste en una lámina semicircular de platino sobre plataforma de silicona de 0,5 cm², y con el electrodo indiferente (ánodo) o neutro constituido por una estructura metálica circular en forma de pequeña moneda.

Esta unidad implantable lleva incorporada una batería de litio como alimentación y prefijados unos parámetros de estimulación como: tipo de onda, duración del pulso, duración del tren de pulsos, frecuencia de pulsos y frecuencia de trenes de pulsos. Todos estos parámetros son: onda tipo Lilly, de 150 μseg, con retraso de 1 miliseg entre pulso anodal y catodal, con tiempo inspiratorio de 1,3 miliseg, frecuencia de 10 hertzios y a 20 respiraciones por minuto.

Dispositivo externo

Es un transmisor de radiofrecuencia (RF) u osciloscopio alimentado por pilas, conectado a una antena circular (Fig. 4), que al acoplarse sobre la unidad implantada le transmite pulsos en forma creciente, lo que permite modificar los niveles de intensidad de corriente que se encuentran graduados en 15 niveles de 250 miliamperios entre 0 y 3,7 amperios.

Estudios radiológicos

Se han obtenido radiografías de tórax, con aparato portátil de rayos X estándar (Fig. 5), en el momento de la ejecución de la plastia muscular y de la denervación, y también después en el momento de realizar la segunda intervención o colocación del implante, es decir, al mes de la denervación y de la plastia. Estas han sido comparadas entre sí y con las obtenidas en el momento de la electroestimulación del nervio toracodorsal.

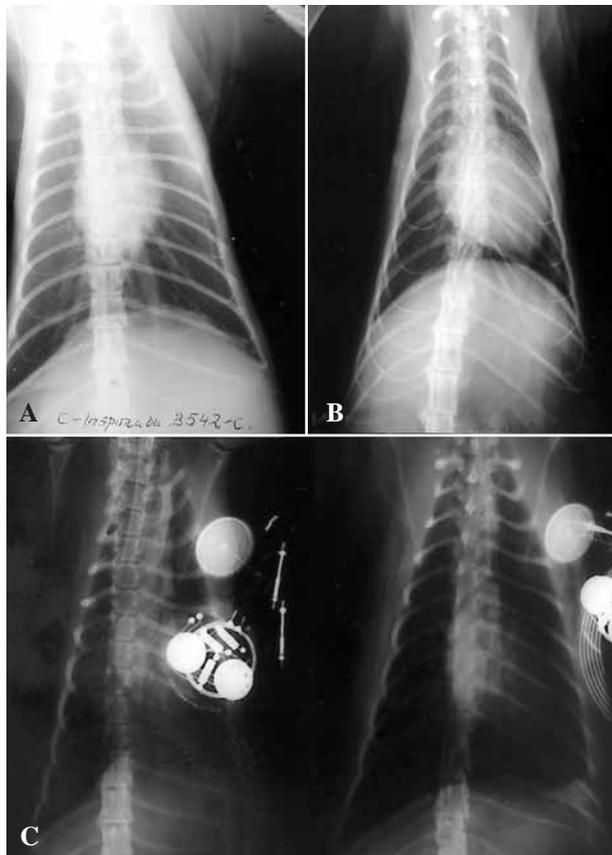


Figura 5. A) Controles radiológicos antes de la realización de la plastia de MLD. B) Control radiológico después de realización de plastia intraabdominal, con marcapasos implantado, observando un mantenimiento del volumen torácico normal. C) Control radiológico después de realización de plastia intratorácica, con marcapasos implantado, observando la amputación del ángulo costofrénico izquierdo.

Espirometría

Hemos utilizado un espirometro digital marca Ohmeda 5420 Boc que determina digitalmente a partir del gas espirado, tanto el volumen corriente como el volumen minuto y la frecuencia respiratoria. La primera determinación ha sido de los volúmenes pulmonares de los gatos anestesiados en respiración espontánea, justo antes de realizar la plastia, para conseguir los volúmenes habituales normales de los animales (Fig. 6). Después también hemos registrado los volúmenes pulmonares con el animal anestesiado, en apnea, una vez realizada la plastia de MLD, detectando los volúmenes movilizados mediante electroestimulación del nervio toracodorsal por medio de un marcapasos diafragmático con una frecuencia respiratoria constante de 20 rpm.

Planimetría

Una vez realizadas las determinaciones funcionales (espirometría) el gato es sacrificado obteniendo mediante esternotomía y laparotomía, con disección amplia, la totalidad del músculo diafragma del animal (Fig. 7), incluyendo la plastia

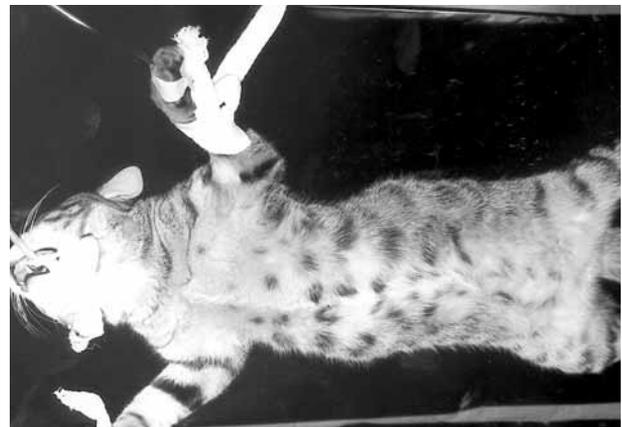


Figura 6. Gato anestesiado efectuando las determinaciones espirométricas.

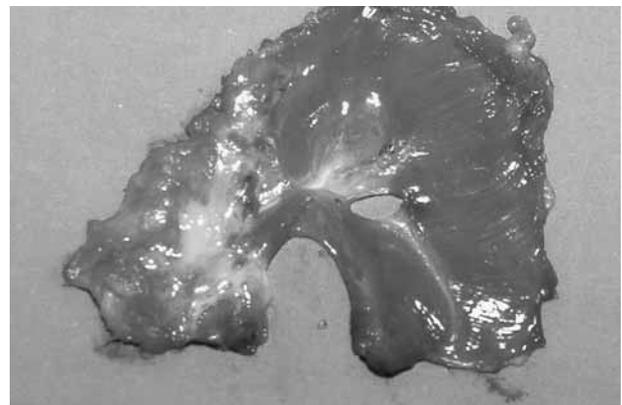


Figura 7. Diafragma portador de plastia de MLD intratorácica, extirpado tras finalizar el proceso de electroestimulación, para estudio planimétrico.

de MLD. Sobre papel milimetrado se efectúa una impresión global del diafragma, oponiendo siempre la cara diafragmática que se encuentra recubierta por la plastia, es decir, la superior en la plastia intratorácica y la inferior en la plastia intraabdominal. Esta impresión nos permite conocer empleando un digitalizador HP-9874A tanto la superficie global del diafragma, como la del hemidiafragma denervado, la porción del mismo recubierta por la plastia y el perímetro tanto del diafragma como del hemidiafragma denervado.

Estudios histológicos

Realizado el estudio planimétrico se obtienen muestras para estudio histológico en microscopía óptica del hemidiafragma contralateral, del hemidiafragma denervado no recubierto y recubierto por plastia muscular. Estas muestras previo proceso de congelación con nitrógeno líquido, se someten a tinción de hematoxilina-eosina, de ATPasa-miofibrilar (ATPasa m) preincubada a varios pH y para enzimas oxidativos (NADH-tr). Después se estudian en microscopía óptica (Fig. 8) y se rea-

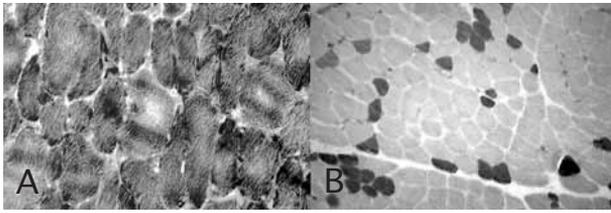


Figura 8. A) Músculo diafragma con tinción de ATPasa miofibrilar, apreciándose un predominio de fibras tipo I (tinción más clara). B) Músculo diafragma con tinción de enzimas oxidativas, observando gran predominio de fibras tipo I (tinción intensa).

liza estudio histomorfométrico o histograma (valoración del tipo y tamaño de miofibrillas), por medio de un ordenador conectado al microscopio, en cuya pantalla aparece el campo observado. Todos estos hallazgos han sido comparados y referenciados a estudios previos del mismo tipo efectuados en músculos de gatos que no han sufrido alteraciones por electroestimulación o denervación. El MLD y el diafragma del gato tienen una media entre 40 y 50% de fibras tipo I.

RESULTADOS

Estudios radiológicos

Comparando las proyecciones que realizamos previamente a la denervación y realización de la plastia de MLD (Fig. 5A), con las obtenidas después (Fig. 5B y C), observamos que:

- No existe una acusada elevación hemidiafragmática a pesar de la denervación en las plastias intratorácicas, y mucho menor en las plastias intraabdominales.
- El volumen del hemitórax izquierdo de los animales ha sido similar radiológicamente antes y después de la plastia.
- No existe una angulación importante de la columna vertebral dorsal.
- Amputación discreta del ángulo costofrénico izquierdo en las plastias intratorácicas.

En las proyecciones radiológicas que se obtuvieron al realizar la electroestimulación del nervio toracodorsal apreciamos:

- Mantenimiento del volumen del hemitórax con plastia.
- Buena expansión de la mitad inferior del hemitórax con la electroestimulación.
- Nivelación de las cúpulas diafragmáticas.

Espirometría

En la primera determinación espirométrica, con el animal anestesiado y en respiración espontánea (Fig. 6) hemos obtenido, como volúmenes pulmonares y frecuencia respiratoria, los siguientes valores medios:

- Volumen minuto: $1.341 \pm 192,87$ cc.
- Volumen corriente: $62,82 \pm 12,05$ cc.

- Frecuencia respiratoria: $21,67 \pm 2,23$ respiraciones por minuto (rpm).
- Volumen min/kg: $385,51 \pm 39,29$ cc/kg.

En la segunda determinación espirométrica los valores registrados reflejan la movilidad torácica que produce la electroestimulación de la plastia muscular de MLD, dependiendo del tipo de plastia (intratorácica vs. intraabdominal), y con frecuencia respiratoria constante de 20 rpm. Los valores medios han sido sometidos a comparación como valores paramétricos de muestras independientes aplicando la T de Student, siendo estadísticamente significativos frente a hipótesis nula, obteniendo los siguientes resultados:

- Plastia intratorácica:
 - Volumen minuto: $323,33 \pm 141,23$ cc.
 - Volumen corriente: $16,16 \pm 7,06$ cc.
 - Volumen minuto/kg: $87,60 \pm 28,59$ cc.
- Plastia intraabdominal:
 - Volumen minuto: $366,67 \pm 87,56$ cc.
 - Volumen corriente: $18,33 \pm 4,37$ cc.
 - Volumen min/kg: $108 \pm 21,32$ cc/kg.

Planimetría

Mediante estudio planimétrico hemos podido obtener las dimensiones de los músculos diafragma de todos los animales, de la zona recubierta por plastia de MLD (Fig. 7), calcular el área de los mismos y establecer una correlación entre áreas recubiertas en ambos tipos de plastias, registrando los siguientes valores medios:

- Plastia intratorácica:
 - Perímetro diafragma: $343,40 \pm 12,98$ mm.
 - Perímetro hemidiafragma denervado: $241,29 \pm 5,38$ mm.
 - Perímetro plastia: $157,02 \pm 14,96$ mm.
 - Área diafragma: $6.646 \pm 231,28$ mm².
 - Área hemidiafragma denervado: $3.277,76 \pm 223,67$ mm².
 - Área plastia: $1.288 \pm 113,09$ mm².
 - Relación área hemidiafragma/plastia: 0,39.
- Plastia intraabdominal:
 - Perímetro diafragma: $334,56 \pm 16,27$ mm.
 - Perímetro hemidiafragma denervado: $233,84 \pm 6,60$ mm.
 - Perímetro plastia: $185,77 \pm 13,86$ mm.
 - Área diafragma: $6.483 \pm 318,66$ mm².
 - Área hemidiafragma denervado: $3.034 \pm 98,70$ mm².
 - Área plastia: $1.496 \pm 53,96$ mm².
 - Relación área hemidiafragma/plastia: 0,49.

Estudios histológicos

En las tinciones con hematoxilina eosina y ATPasa miofibrilar (Fig. 8) se ha observado en los hemidiafragmas con plastia las lesiones típicas de denervación: pérdida de intensidad de tinción, menor diámetro de miofibrillas, inclusiones vacuolares, etc. En las plastias intratorácicas de MLD se ha apreciado aproximadamente en el 50% la presencia de necrosis de miofibrillas en HE, no habiéndose detectado en ninguna de las realizadas de forma intraabdominal. Además, en

tinciones de ATPasa miofibrilar y para enzimas oxidativos (Fig. 8) se detecta transformación de miofibrillas, con proporciones de fibras tipo I entre 40 y 45%.

DISCUSIÓN

El MLD es un músculo muy versátil y con gran adaptabilidad a gran variedad de situaciones clínicas, con un mínimo de alteraciones o morbilidad del sitio donador, y por ello ha sido ampliamente utilizado para reconstrucción quirúrgica, tanto en cuello como en tórax y abdomen⁽¹⁻⁶⁾.

En este trabajo hemos diseñado dos prototipos de plastias de MLD para reparación diafragmática intratorácica e intraabdominal respectivamente, con un mismo diseño de construcción de la plastia a base de rotación del flap músculo-aponeurosis del MLD del gato, a partir de su extremo inferior (lumboesquelético) que permanece anclado a sus inserciones originarias, manteniendo intacto el pedículo vasculonervioso toracodorsal, y desinsertando el extremo superior (humeral). En la mayoría de trabajos esta plastia muscular se ha realizado mediante sección del pedículo toracodorsal que proporciona una mayor disponibilidad del flap muscular a costa de denervación y mucho menor aporte de irrigación. En ambos grupos de animales, el flap muscular disponible ha recubierto la cúpula diafragmática, con una proporción en relación a la superficie total del hemidiafragma de 0,39 en las intratorácicas y de 0,49 en las intraabdominales, que supone un gran recubrimiento teniendo en cuenta la forma cupular del hemidiafragma.

En aquellos trabajos en los que el MLD se ha utilizado para sustituir el hemidiafragma, el nervio toracodorsal ha sido seccionado con conservación del nervio frénico correspondiente⁽⁴⁾, habiéndose procedido en algunos casos a efectuar una neuroanastomosis entre ambos nervios^(3,6) previo clipaje del nervio toracodorsal a 3 cm de su recorrido en el músculo, y comunicándose que se recupera la funcionalidad diafragmática, aunque no se objetiva dicha función. En este trabajo hemos mantenido la inervación original del MLD evitando los trastornos secundarios a la denervación y desvascularización por sección del paquete toracodorsal, para que nos permitiera la electroestimulación con objeto de obtener función del músculo trasplantado.

Hemos procedido a la sección del nervio frénico ipsilateral para conocer si el MLD puede sustituir tanto anatómicamente como funcionalmente al hemidiafragma. En este sentido los estudios radiológicos nos han aportado la convicción de que a pesar de la denervación diafragmática no ha existido una reducción volumétrica importante del hemitórax, ni desviación de la columna vertebral del gato, hecho achacable a la sujeción proporcionada por la plastia practicada. Tan sólo se aprecia una amputación del ángulo costofrénico en el grupo de animales a los que se realizó una plastia intratorácica, lo que expresa una pequeña reducción del volumen intratorácico.

Los estudios espirométricos han objetivado que la electroestimulación del MLD es capaz de movilizar volumen de intercambio gaseoso, y que para una frecuencia respiratoria de 20 rpm ha representado entre la cuarta y la tercera parte del volumen corriente movilizado por el diafragma del gato.

La comparación entre ambos tipos de plastias de MLD arrojan unos resultados funcionales más favorables hacia la plastia intraabdominal; así, radiológicamente apreciamos un mejor mantenimiento del volumen intratorácico y espirométricamente un volumen corriente y minuto claramente mayores que los obtenidos con la plastia intratorácica. Además también se consigue un mayor recubrimiento diafragmático con la plastia intraabdominal con un área media de $1.496 \pm 53,96$ mm², mientras que con la intratorácica fue de $1.288 \pm 113,09$ mm². Esto permite una mayor proporción de recubrimiento con respecto al área del hemidiafragma de 0,49 sobre 0,39.

La electroestimulación del MLD, realizada con un marcapasos diafragmático, ha sido posible por la conservación del pedículo toracodorsal, demostrando que esta plastia funcionalizada de MLD puede sustituir la función diafragmática, aunque en un menor grado que el diafragma original. No obstante, tenemos que tener en cuenta que el período de condicionamiento de aproximadamente 1 mes en cada animal resulta insuficiente para este fin. La transformación de fibras musculares ha sido escasa (40-45%), con producción de lesiones fibrilares. Esto nos lleva a formular previsiblemente que si dicho período de condicionamiento hubiera sido más lento, progresivo y adecuado, hubiéramos obtenido un mayor grado de transformación fibrilar, con una mejoría notable de los parámetros funcionales.

Por tanto, consideramos que la plastia funcionalizada de MLD constituye una alternativa real para la sustitución diafragmática, que evita los problemas de los materiales inertes hasta ahora empleados (deformidad esquelética, recurrencia, movimiento paradójico, rechazo, etc.), y proporciona aporte funcional, que sin duda será mejorable en posteriores estudios.

BIBLIOGRAFÍA

1. Moelleken BR, Mathes SA, Chang N. Latissimus dorsi muscle musculocutaneous flap in chest-wall reconstruction. *Surg Clin North Am* 1989;**69**(5):977-90.
2. Bostwick J. Reconstruction after mastectomy. *Surg Clin North Am* 1990;**70**(5):1125-40.
3. Samarakkody U, Klaassen M, Nye B. Reconstruction of congenital agenesis of hemidiaphragm by combined reverse latissimus dorsi and serratus anterior muscle flaps. *J Pediatr Surg* 2001;**36**(11): 1637-40.
4. Lee SL, Poulos ND, Greenholz SK. Staged reconstruction of large congenital diaphragmatic defects with synthetic patch followed by reverse latissimus dorsi muscle. *J Pediatr Surg* 2002;**37**(3):367-70.
5. The Congenital Diaphragmatic Hernia Study Group. Bilateral congenital diaphragmatic hernia. *J Pediatr Surg* 2003;**38**(3):522-4.

6. Sydorak RM, Hoffman W, Lee H, Yinglig CD, Longaker M, Chang J, Smith B, Harrison MR, Albanese CT. Reversed latissimus dorsi muscle flap for repair of recurrent congenital diaphragmatic hernia. *J Pediatr Surg* 2003;**38**(3):296-300.
7. Moss RL, Chen CM, Harrison MR. Prosthetic patch durability in congenital diaphragmatic hernia: A long-term follow-up study. *J Pediatr Surg* 2001;**36**:152-4.
8. Lacey SR, Goldsthorh JF, Kosloske AM. Repair of agenesis of hemidiaphragm by prosthetic materials. *Surg Gynecol Obstet* 1983; **156**:310-2.
9. Zhang F, Lineaweaver WC, Üsyüner T, et al. Comparison of muscle mass preservation in denervated muscle and transplanted muscle flaps after motor and sensory reinnervation and neurotization. *Plast Reconstr Surg* 1997;**99**:803-14.
10. McGovern GJ, Park SB, Lao RL, Christlieb IY, McGovern GJ Jr. Dynamic cardiomyoplasty in patients. *J Heart Transplant* 1990; **9**(3):258-63.
11. Kucukaksu DS, Tarcan O, Kucuker S, Ozatik MA, Sakaogullari Z, Sener E, Tasdemir O. Dynamic cardiomyoplasty as a biomechanic bridge to heart transplantation. *Heart Lung* 2003;**32**(6):407-11.
12. Rigatelli G, Rigatelli G, Barbiero M, Cotogni A, Bandello A, Riccardi R, Carraro U. Demand stimulation of latissimus dorsi heart wrap: experience in humans and comparison with adynamic girdling. *Ann Thorac Surg* 2003;**76**(5):1587-92.
13. Yilmaz MB, Tufekcioglu O, Korkmaz S, Sabah I. Dynamic cardiomyoplasty: impact of effective pacing. *Int J Cardiol* 2003;**91**(1):101-2.
14. Chachques JC, Argyriadis PG, Fontaine G, Hebert JL, Frank RA, D'Attellis N, Fabiani JN, Carpentier AF. Right ventricular cardiomyoplasty: 10-year follow-up. *Ann Thorac Surg* 2003;**75**(5):1464-8.
15. Chu-Jeng Chiu R, Bourgeois IM (eds). *Transformed muscle for cardiac assist and repair*. Futura Publishing Company, Inc New York 1990.
16. Marzocchi M, Brouillette RT, Klemka-Walden LM, Heller SL, Weese-Mayer DE, Brozanski BS, Caliendo J, Daood M, Ilbawi MN, Hunt CE. Effects of continuous low-frequency pacing on immature canine diaphragm. *J Appl Physiol* 1990;**69**(3):892-8.
17. Brooks WW, Bing OH, Gaasch WH, Karlinsky JB, Goldstein RH, Conrad CH. Comparison of contractile function of diaphragm and cardiac muscle in response to paired electrical stimulation. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol* 2002;**133**(1):53-62.
18. Fernández-Arciniega F, Garrido García H, Alonso Calderón JL, Pérez Domínguez T, de la Hoz F, Cabello Fernández A. Histochemical and functional changes in diaphragm muscle produced by the diaphragm pacemaker induced conditioning period. An experimental study. *Research in Surgery* 1992;**4**(2):138-143.
19. Elefteriades JA, Quin JA, Hogan JF, Holcomb WG, Letsou GV, Chlosta WF, Glenn WW. Long-term follow-up of pacing of the conditioned diaphragm in quadriplegia. *Pacing Clin Electrophysiol* 2002;**25**(6):897-906.
20. Takeda S, Miyoshi S, Matsuda K, Kido T, Nakahara K. Clinical application of diaphragm pacing. *Masui* 1997;**46**(Suppl):S125-32.
21. Elefteriades JA, Quin JA. Diaphragm pacing. *Ann Thorac Surg* 2002;**73**(2):691-2.
22. Elefteriades JA, Quin JA. Diaphragm pacing. *Chest Surg Clin N Am*. 1998;**8**(2):331-57.
23. Brouillette RT, Marzocchi M. Diaphragm pacing: clinical and experimental results. *Biol Neonate* 1994;**65**(3-4):265-71.
24. Weese-Mayer DE, Hunt CE, Brouillette RT, Silvestri JM. Diaphragm pacing in infants and children. *J Pediatr* 1992;**120**(1):1-8.
25. Girsch W, Koller R, Holle J, Bijak M, Lanmuller H, Mayr W, Thoma H. Vienna phrenic pacemaker--experience with diaphragm pacing in children. *Eur J Pediatr Surg* 1996;**6**(3):140-3.
26. Weese-Mayer DE, Silvestri JM, Kenny AS, Ilbawi MN, Hauptman SA, Lipton JW, Talonen PP, Garcia HG, Watt JW, Exner G, Baer GA, Elefteriades JA, Peruzzi WT, Alex CG, Harlid R, Vincken W, Davis GM, Decramer M, Kuenzle C, Saeterhaug A, Schober JG. Diaphragm pacing with a quadripolar phrenic nerve electrode: an international study. *Pacing Clin Electrophysiol* 1996;**19**(9):1311-9.
27. Alonso Calderón JL, Garrido García H, Pérez Domínguez T, Mazaira J. Simultaneous, bilateral and permanent ventilation with a diaphragm pacing in childhood: the implantation technique and indications. *Cir Pediatr* 1994;**7**(1):3-7.
28. Garrido-Garcia H, Martin-Escribano P, Palomera-Frade J, Arroyo O, Alonso Calderon JL, Mazaira-Alvarez J. Transdiaphragmatic pressure in quadriplegic individuals ventilated by diaphragmatic pacemaker. *Thorax* 1996;**51**(4):420-3.
29. Garrido-Garcia H, Mazaira Alvarez J, Martin Escribano P, Romero Ganuza J, La Banda F, Gambarrutta C, Garcia ME, Labarta C, Arroyo O, Sebastian de la Cruz F, Gutierrez R, Garcia Moreno J. Treatment of chronic ventilatory failure using a diaphragmatic pacemaker. *Spinal Cord* 1998;**36**(5):310-4.