



Universitat
de les Illes Balears

TRABAJO DE FIN DE GRADO

LA BANDA MIOCÁRDICA VENTRICULAR DE FRANCISCO TORRENT-GUASP. DE CONCEPTO REVOLUCIONARIO A EXPLICACIÓN PLAUSIBLE DE LA MECÁNICA CARDÍACA. EVIDENCIAS E INTERROGANTES.

Cristina Cerdeira Cerdeira

Grado en Medicina

Facultad de Medicina

Año Académico 2022-23

LA BANDA MIOCÁRDICA VENTRICULAR DE FRANCISCO TORRENT-GUASP. DE CONCEPTO REVOLUCIONARIO A EXPLICACIÓN PLAUSIBLE DE LA MECÁNICA CARDÍACA. EVIDENCIAS E INTERROGANTES.

Cristina Cerdeira Cerdeira

Trabajo de Fin de Grado

Facultad de Medicina

Universitat de les Illes Balears

Año Académico 2022-23

Palabras clave del trabajo:

Banda, miocardio, lazada, segmento, dinámica, torsión.

Nombre de la Tutora del Trabajo: Dra. Joana Núñez Morcillo.

Se autoriza a la Universidad a incluir este trabajo en el Repositorio Institucional para su consulta en acceso abierto y difusión en línea, con fines exclusivamente académicos y de investigación

Autor/a		Tutor/a	
Sí	No	Sí	No
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

***“No trato de desmontar completamente las teorías
existentes, solo de especificar y puntualizar el plan general
de la estructura de la pared ventricular del corazón”***

Francisco Torrent-Guasp

Resumen

Durante mucho tiempo, un copioso número de investigadores han mostrado interés en la complejidad de la distribución de las fibras miocárdicas ventriculares. Francisco Torrent-Guasp, a través de cuidadosos estudios de disecciones cardíacas, descubrió que la compleja estructura del miocardio ventricular se debe a una orientación espacial de doble hélice de una sola banda muscular. Considerando a la banda miocárdica como resultado de los cambios que ha experimentado el aparato circulatorio a lo largo de la evolución.

La forma determina la función, y una vez que la anatomía de la banda quedó clara para Torrent-Guasp, le permitió predecir la mecánica cardíaca y sugerir que el miocardio ventricular funciona como una unidad agonista-antagonista.

Este trabajo se centra en explicar la disección de la banda siguiendo las pautas establecidas por Torrent-Guasp, describir los segmentos en los que se divide, así como, dilucidar la dinámica y función ventricular que se deriva de dicha anatomía, enfatizando en la interacción agonista-antagonista, la fase de expulsión y la fase de succión ventricular. Sin olvidar reflejar el respaldo de las técnicas de imagen cardíaca al modelo de la banda miocárdica. Abordando, en última instancia, las controversias surgidas entre los detractores y defensores de esta teoría.

Índice

1. Introducción y Objetivos	pág. 6-7
2. Metodología	pág. 7
3. Resultados	pág. 7-26
4. Conclusiones.....	pág. 26-27
5. Referencias.....	pág. 27-31

1-Introducción y Objetivos

1.1-Introducción

Como estudiante de sexto de medicina, estos últimos seis años de estudio me han permitido darme cuenta de que la investigación médica desempeña un papel crucial en el avance del conocimiento de las enfermedades médicas, así como en el desarrollo de nuevas estrategias terapéuticas. A pesar de que los estudiantes de medicina aprenden una gran cantidad de información durante la carrera, es importante no conformarse con lo que se les enseña y buscar respuestas a las preguntas que surgen en el camino.

La búsqueda del conocimiento y el anhelo por aprender son fundamentales para progresar en el campo de la medicina. La investigación en este campo puede ayudar a entender mejor cómo funcionan el cuerpo humano y las diferentes patologías, lo que a su vez puede llevar al descubrimiento de nuevos tratamientos, mejores orientaciones diagnósticas y formas más efectivas de prevenir enfermedades. Mejorando la *praxis* médica, consiguiendo una atención sanitaria más efectiva, así como un impacto significativo en la calidad de vida de las personas. Por consiguiente, es importante desarrollar una actitud crítica y curiosa hacia el conocimiento que nos presentan. Si no entendemos algo, no debemos simplemente aceptarlo sin cuestionarlo.

Un claro ejemplo de lo expresado previamente fue Francisco Torrent-Guasp, reconocido médico e investigador español, quien sostenía que la investigación es la base de la medicina moderna. Torrent-Guasp entendió la importancia de investigar y cuestionar lo que se nos enseña. No se conformó con la teoría aceptada de su tiempo que explicaba el funcionamiento del corazón como una simple compresión y relajación de sus cámaras. En cambio, se propuso investigar el corazón desde un punto de vista más detallado y profundo para entender mejor su fisiología y función. Su enfoque en la investigación cardíaca le permitió descubrir nuevos hallazgos, técnicas diagnósticas y tratamientos quirúrgicos de enfermedades cardíacas que hoy en día son fundamentales en la práctica clínica. Su trabajo demuestra la importancia de investigar en cualquier campo de la medicina para poder avanzar y mejorar en nuestra práctica.

1.2-Objetivos del Trabajo de Fin de Grado

- 1) Repasar la bibliografía de Francisco Torrent-Guasp para conocer su investigación.

- 2) Estudiar el modelo de la banda miocárdica de Francisco Torrent-Guasp como un nuevo concepto en la comprensión de la arquitectura global, tridimensional y funcional del miocardio ventricular.
- 3) Conocer las técnicas de imagen cardíaca más utilizadas para valorar la función cardíaca.
- 4) Describir de forma ordenada las principales controversias generadas por la teoría de la banda miocárdica.
- 5) Potenciar la inquietud científica ante lo establecido.

2-Metodología

Revisión bibliográfica: *state of the art*. Se ha realizado una amplia revisión bibliográfica sobre el modelo de la banda miocárdica, debido a que esta teoría propone una nueva comprensión de la estructura y dinámica del corazón humano. Con esta revisión, se pretende conseguir identificar los puntos clave de dicha teoría, así como aclarar las controversias surgidas en la comunidad médica y científica, permitiendo una comprensión crítica y actualizada del modelo.

3-Resultados

3.1-Resumen histórico

A lo largo de la historia, se ha realizado un gran número de disecciones anatómicas cardíacas con el objetivo de estudiar y conocer la estructura básica de las fibras musculares del corazón. Concretamente, las disecciones realizadas por Wer (1669), Gerdy (1823), Weber (1831), Pettigrew (1860), Krehl (1891) y Mall (1911) objetivaron que los trayectos de las fibras del ventrículo izquierdo presentan una disposición que se asemeja a la figura de un 8, adquiriendo una forma de medio cono en la base y en el ápex. A su vez, Pettigrew denomina este hallazgo como "Ley de la doble espiral cónica" (1).

Hort en 1960, describió que las fibras miocárdicas cambian de orientación en la capa compacta. Además, informó que las fibras son localmente paralelas y que adquieren una

disposición característica: oblicua en la mitad externa de la capa compacta, circunferencial en la mitad de la pared del ventrículo izquierdo, y otra vez oblicua pero en sentido opuesto en la mitad interna de la capa compacta (1).

En conclusión, el miocardio se encuentra formado por fibras cuyos patrones de orientación están muy bien definidos. Cabe destacar, que los principales trayectos de las fibras se caracterizan por formar superficies bien definidas y lisas, siendo a *grosso modo*, rotacionalmente simétricas. Aunque, dichas fibras presentan, como se ha descrito anteriormente, un cambio de orientación en la capa compacta de la pared (1).

Sin embargo, a lo largo de la historia no solo se han realizado estudios acerca de la estructura microscópica y macroscópica del corazón, sino también sobre la función cardíaca. Para ello, es necesario remontarse unos 2000 años atrás, cuando los griegos Erasistrato y Galeno, propugnaron que la dilatación ventricular era la función más relevante del corazón. Teoría que permaneció prevalente hasta que Harvey, en el siglo XVII, antepuso la contracción de las cavidades ventriculares a su dilatación, considerando a esta última, de manera discutible, como resultado de la brusca irrupción de la sangre procedente de las aurículas (2).

Francisco Torrent-Guasp (3) en 1954, publicó un trabajo teórico, en el cual defendía la existencia de una succión ventricular diastólica atribuible a una contracción, destacando la imposibilidad de atribuir el llenado ventricular a la presión auricular. Brecher (4-6) en 1956, después de expresar sus dudas acerca de la teoría planteada por Torrent-Guasp, consiguió demostrar, de forma experimental, la existencia de succión ventricular diastólica.

Por último, Oliete (7) fue capaz de demostrar, mediante secuencias de cine de resonancias magnéticas cardíacas, la existencia de la dinámica y función ventricular descritas por Torrent-Guasp.

3.2-Biografía

Francisco Torrent-Guasp (Denia, 1931 - Madrid, 2005) fue un cardiólogo adelantado a su época, desde sus comienzos en la Facultad de Medicina siempre se interesó por la función cardíaca. Se podría decir que dedicó gran parte de su vida a buscar la lógica en el funcionamiento del corazón como bomba. El profesor Torrent-Guasp nunca creyó en el dogma clásico de la mecánica cardíaca, que atribuye el llenado ventricular a la presión auricular. Él siempre defendió que dicho llenado es el resultado de una succión ejercida desde el propio ventrículo (8).

Por ello, empezó a diseccionar corazones de todo tipo de especies, incluida la humana, hasta que en 1973 describió, por primera vez en la historia, la disposición de las fibras musculares ventriculares como una banda miocárdica que se pliega en una doble hélice. Finalmente, 14 años después de dicha publicación, describió cómo la contracción progresiva de la banda permitía explicar las dos principales funciones del corazón: la expulsión y la succión. Así como que la propagación del estímulo eléctrico a lo largo de la banda miocárdica, es congruente con la secuencia de eventos que acontecen en el ciclo cardíaco (8).

En virtud de ello, la banda miocárdica descrita por Francisco Torrent-Guasp, ha generado un gran impacto en la cardiología actual debido a sus posibles implicaciones clínicas. En el campo de la imagen, ha permitido entender la dinámica documentada con las nuevas técnicas (8). Mientras que en el campo de la cirugía, ha guiado la introducción de nuevas técnicas quirúrgicas, sobre todo, en lo que respecta a la insuficiencia cardíaca congestiva (9).

3.3-La banda miocárdica

3.3.1-Embriología

Torrent-Guasp consideraba que la banda miocárdica era el resultado de los cambios sufridos en el sistema circulatorio a lo largo de la evolución. Incluso llegó a proponer una explicación filogenética de la evolución del sistema circulatorio desde los peces hasta los seres humanos. Estos cambios implicaban una extravasación del contenido sanguíneo al interior de una estructura helicoidal autocontenida a modo de bomba. Esta estructura se originaría de la transformación de una parte del vaso sanguíneo y sería la encargada de constituir el ventrículo izquierdo y derecho, formando por lo tanto, la conocida como banda miocárdica (10,11). (Fig 1)

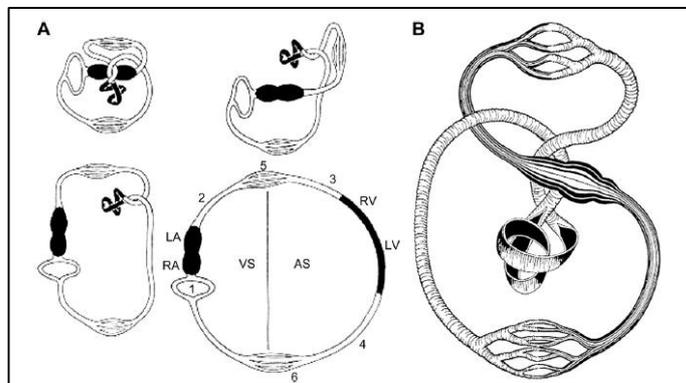


Figura 1. Representación de la evolución del sistema circulatorio (11).

3.3.2-La estructura macroscópica del miocardio ventricular

Como se ha mencionado anteriormente, el Dr. Francisco Torrent-Guasp dedicó gran parte de su carrera al estudio de la anatomía macroscópica del corazón, demostrando que:

“El miocardio ventricular configura una banda extendida desde la raíz de la arteria pulmonar a la raíz de la aorta que delimita, describiendo en el espacio una helicoide, dos cavidades, los llamados ventrículos” (2, p.92).

En dicha banda, se pueden distinguir dos lazadas. Por una parte, la lazada basal y por otra parte, la lazada apexiana. (Fig 2). Cada una de las cuales se divide en dos segmentos: la lazada basal (fig 2 a-b) la componen los segmentos derecho e izquierdo, mientras que la lazada apexiana (fig 2 b-c) está integrada por los segmentos descendente y ascendente (2). De la misma manera, se puede observar en el centro de la banda un pliegue que gira 180 grados (fig 2 b), encargado de establecer el límite entre la lazada basal y la apexiana (9).

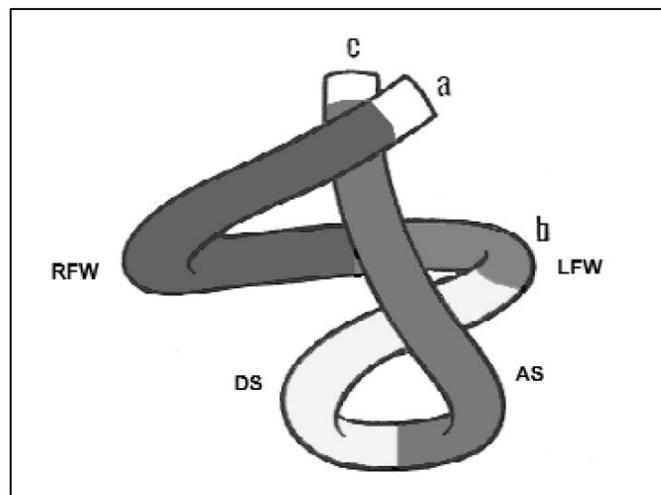


Figura 2. Representación de la configuración espacial del miocardio ventricular en doble hélice (9).

La lazada basal discurre desde la raíz de la arteria pulmonar hasta el pliegue central de la banda (músculo papilar anterior). La lazada apexiana se extiende desde este pliegue central hasta la raíz aórtica. El límite entre el segmento derecho e izquierdo de la lazada basal viene determinado por el surco interventricular posterior (12). El segmento derecho se extiende desde la raíz de la arteria pulmonar hasta el surco interventricular posterior, además de definir el borde externo del orificio de la válvula tricúspide. El

segmento izquierdo se extiende desde el surco interventricular posterior hasta el pliegue central, además de definir el borde externo del orificio de la válvula mitral (9).

El segmento descendente de la lazada apexiana, se extiende desde el pliegue central de la banda hasta el músculo papilar posterior. El segmento ascendente va desde el músculo papilar posterior hasta la raíz de la aorta (9). El límite entre ambos segmentos se haya determinado, como se ha visto, por el músculo papilar posterior. Estos dos segmentos son los responsables de formar de manera mayoritaria el septo interventricular. Por último, el ápex ocupa el lugar donde el segmento descendente gira 90 grados para convertirse en el segmento ascendente (12).

Gracias a estudios que identifican (por ejemplo con colores) cada uno de los segmentos, podemos analizar su presencia en las paredes ventriculares. Si analizamos el corazón desde las proyecciones habituales vemos que (11):

- Eje largo: el segmento derecho constituye el total del grosor de la pared libre del ventrículo derecho; el segmento izquierdo ocupa una pequeña área en la porción posterobasal de la pared libre del ventrículo izquierdo, superponiéndose al segmento ascendente; los segmentos ascendente y descendente contribuyen al grosor de la porción media del septo interventricular; la pared posterior del ventrículo izquierdo está constituida en sus regiones basales por el segmento izquierdo y en sus regiones medioventriculares y apicales por el segmento ascendente. (Fig 3)

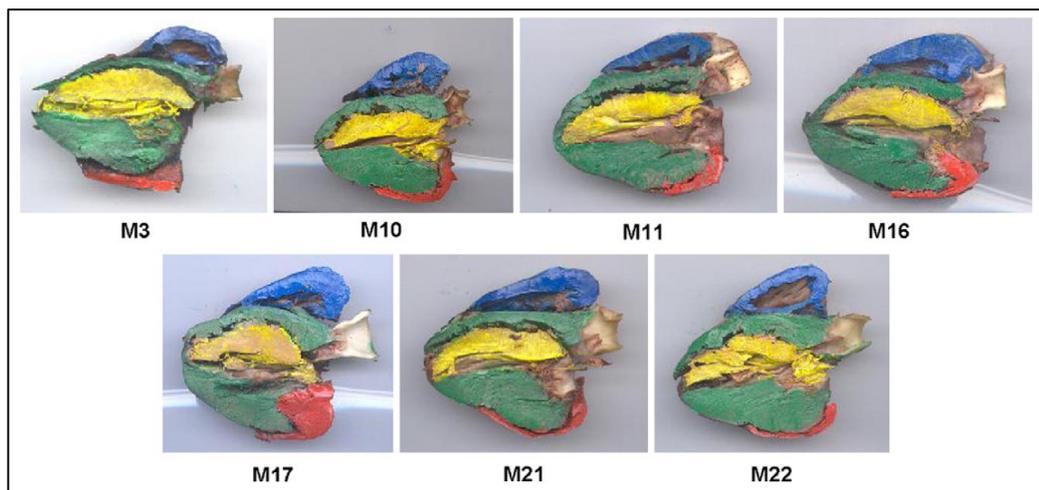


Figura 3. Proyecciones de ejes largos de siete corazones porcinos coloreados. Segmento derecho (azul), segmento izquierdo (rojo), segmento descendente (amarillo), segmento ascendente (verde) (11).

- Cuatro cámaras: el segmento descendente ocupa la superficie interna del ventrículo izquierdo, encontrándose rodeado por el segmento ascendente; en la pared lateral del ventrículo izquierdo, la proporción ocupada por el segmento ascendente contrasta con la pequeña proporción que ocupa la lazada basal. (Fig 4)

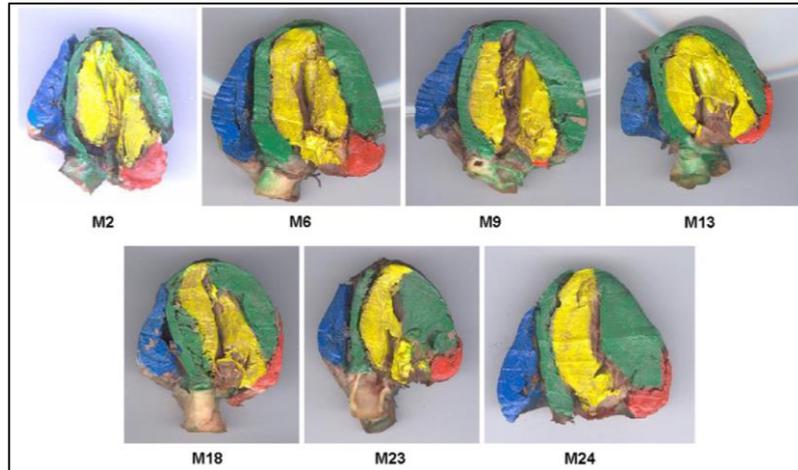


Figura 4. Proyecciones de cuatro cámaras de corazones porcinos coloreados (11).

- Eje corto, se observa una distribución compleja de los segmentos de la banda: en la base del corazón, los segmentos derecho e izquierdo se encuentran dispuestos de manera consecutiva, rodeando tanto al segmento descendente como al ascendente; en la porción media de los ventrículos, el segmento ascendente rodea casi 360 grados al descendente; a nivel del ápex, la distribución segmentaria es similar a la de la porción media de los ventrículos. (Fig 5)

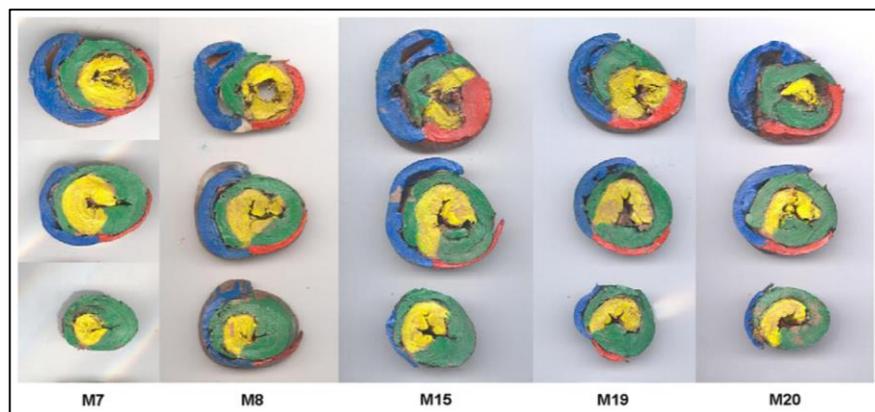


Figura 5. Proyecciones de ejes cortos de corazones porcinos coloreados. Arriba, lazada basal; medio, porción media de los ventrículos; abajo, lazada apical (11).

Igualmente, la inspección macroscópica del miocardio ventricular permite observar la presencia de fibras miocárdicas. Una vez hervido el corazón y por ende ablandado el colágeno, no es necesario el uso de herramientas para poder seguir el curso principal (predominante) de las fibras. Por lo tanto, una vez desplegada la banda, las fibras miocárdicas son fácilmente identificadas y seguidas desde la arteria pulmonar hasta la aorta. Estas fibras son la suma de varios miocitos envueltos en una malla esponjosa formada por tejido conectivo, vasos sanguíneos y nervios que tienen una orientación local precisa (11). Conviene enfatizar que Torrent-Guasp descubrió ciertas áreas, como el septo interventricular, en las que los haces de fibras musculares se cruzaban en diferentes planos, siendo estos últimos conocidos como planos de clivaje (13). (Fig 6)

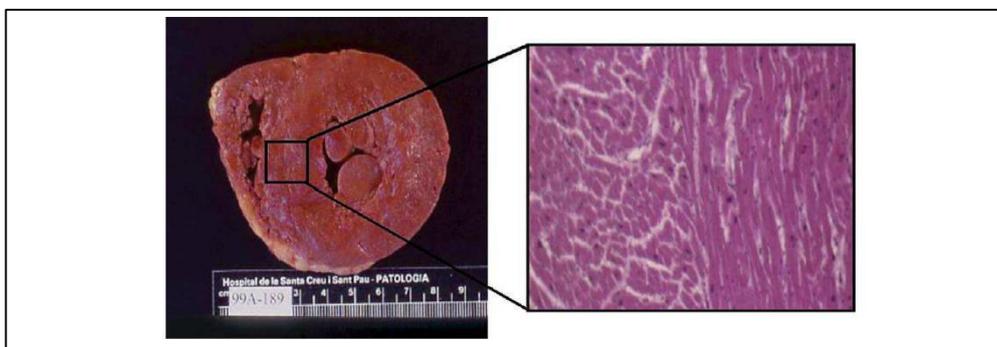


Figura 6. Disposición de las fibras miocárdicas en el septo interventricular (13).

Como hemos dicho, los hallazgos descritos acerca de la banda miocárdica, son el resultado de un gran número de disecciones cardíacas realizadas de manera meticulosa por Torrent-Guasp durante más de 25 años. Los corazones se hervían previamente durante un periodo de tiempo prolongado con el objetivo de ablandar el miocardio, permitiendo así la posterior disección (9,14-16). Una vez hervidos los corazones, las aurículas pueden separarse fácilmente de los ventrículos. Además, la clave para desplegar sistemáticamente la banda ventricular se basa en el conocimiento de los planos de clivaje, lo que proporciona puntos de referencia para la disección manual (11). (Fig 7)

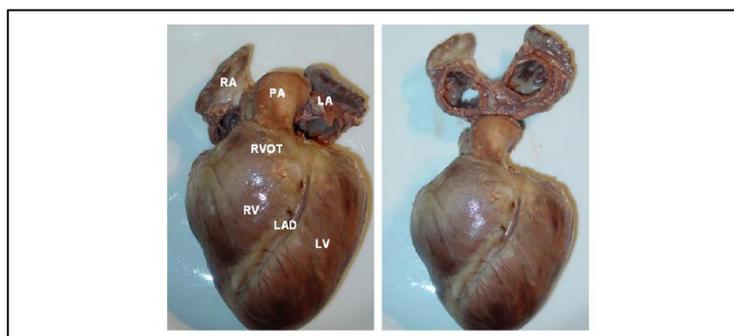


Figura 7. Aspecto de los ventrículos previos a la disección y posteriores a la disección (11).

Según la técnica propuesta por Torrent-Guasp la disección de la banda miocárdica se realizaría en 3 pasos. (Fig 8). Primero (fig 8 A-B): para separar la pared libre del ventrículo derecho, las fibras superficiales que se encuentran en la cara anterior del ventrículo izquierdo son cortadas a lo largo del surco interventricular anterior. Segundo (fig 8 C-D): la aorta se desmonta al separarla conforme el plano de la escisión. Esta acción define dos estratos musculares que forman un ángulo de 90º a nivel del septo interventricular: las fibras del segmento ascendente y las fibras del segmento descendente. Tercero (fig 8 D-E): para obtener la banda miocárdica completamente estirada desde la arteria pulmonar hasta la aorta, se procede a desenrollar el bucle apical (9).

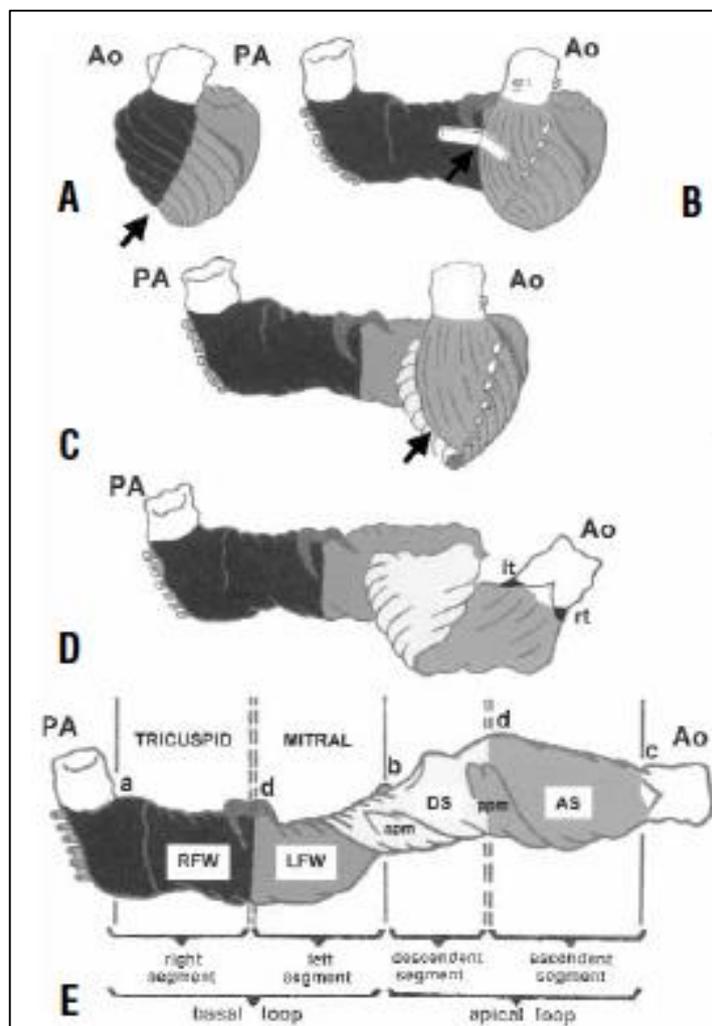


Figura 8. Segmentos de la banda miocárdica y estructuras cardíacas (9).

En conclusión, la banda miocárdica ventricular describe dos espirales helicoidales: la lazada basal y la lazada apexiana (9). Mientras que la pared libre del ventrículo derecho se encuentra constituida por el segmento derecho; el segmento izquierdo forma parte de la pared libre del ventrículo izquierdo, al igual que los segmentos ascendente y descendente de la lazada apexiana. Hecho que justifica que la pared libre del ventrículo izquierdo, al estar compuesta por dos lazadas, sea más gruesa que la pared libre del ventrículo derecho, compuesta por una única lazada (2,9,17-19).

3.3.3-La propagación de los estímulos eléctricos a través del miocardio ventricular

Durante la segunda mitad del siglo XX, se llevaron a cabo un gran número de trabajos experimentales en diferentes centros de investigación, con el objetivo de interpretar el modo en el que tiene lugar la propagación de los estímulos eléctricos por el miocardio ventricular (2).

Lewis en 1915, estableció que los estímulos eléctricos que llegan al miocardio ventricular a través del haz de His, atraviesan en dirección endocardio-epicardio las paredes ventriculares. De la misma manera, se admite que en cada ciclo cardíaco, las primeras estructuras contráctiles eléctricamente activadas son los músculos papilares, localizados en el endocardio. Pero diferentes autores consideran que estos conceptos son discutibles a la luz de los nuevos conocimientos de la estructura macroscópica del corazón (2).

Entre otros, estas creencias han sido refutadas por fisiólogos como Sands-Robb y Robb (20,21) que en 1936 concluyeron que la difusión de los estímulos ocurre axialmente a lo largo de los haces musculares, siguiendo una trayectoria longitudinal paralela a la dirección de las fibras musculares y no, como se había postulado previamente, un sentido transversal. Este hecho fue descubierto tras realizar un gran número de estudios electrocardiográficos de los haces musculares.

Cuatro años después, en 1970, Armour y Randall (22) describieron que la difusión del estímulo eléctrico ocurre en dirección epicardio-endocardio. En primer lugar, se produce la contracción del subepicardio, formando una rígida coraza externa. A continuación, se genera la contracción del resto del miocardio ventricular (subendocardio), responsable del aumento de la presión intraventricular. Esto es así, a excepción de la cara anterior del ventrículo izquierdo, donde la difusión de los estímulos ocurre desde el endocardio al epicardio.

3.3.4-La dinámica ventricular

Observando a los corazones latir de manera directa o mediante técnicas de imagen, se pueden distinguir, en cada ciclo cardíaco, los siguientes cuatro movimientos ventriculares, los cuales se suceden consecutivamente (2):

1. Estrechamiento: disminución del diámetro transversal de las cavidades ventriculares.
2. Acortamiento: reducción del eje longitudinal de las cavidades ventriculares.
3. Alargamiento: incremento del eje longitudinal de los ventrículos.
4. Ensanchamiento: aumento del diámetro transversal de los ventrículos.

Si se compara el desplazamiento del ápex y de la base ventricular, el ápex se mantiene prácticamente inmóvil, desplazándose mínimamente en comparación con el desplazamiento efectuado por la base ventricular. Se podría decir que se trata de un fenómeno paradójico, ya que la base, que se encuentra anclada a la arteria pulmonar, arteria aorta y aurículas, es la responsable de la movilidad. En tanto que, el ápex, estructura libre de anclajes, es el responsable de la inmovilidad (2).

Esta situación viene determinada por dos hechos: en primer lugar, durante la expulsión de sangre desde los ventrículos hacia las arterias, el ápex del corazón permanece fijo o apenas se mueve debido a la fuerza de retropropulsión, que le obliga a ejercer una compresión contra la pared costal mientras se produce la expulsión ventricular. En segundo lugar, el alargamiento de los ventrículos, después de finalizar dicha expulsión, también contribuye a la compresión del ápex sobre la pared costal (2).

Por consiguiente, el alejamiento y acercamiento del ápex con respecto a la pared costal no contribuye, respectivamente, al aumento y disminución del volumen de las cavidades ventriculares (2). Si no que al descender la base ventricular durante la sístole, se produce una reducción del volumen de los ventrículos, lo que genera la fase de eyección. En cambio, con el ascenso de la base ventricular durante la diástole, se produce un aumento del volumen los ventrículos, responsable de la fase de succión (9).

Por otro lado, es importante destacar otro aspecto: el desplazamiento que se produce con los movimientos transversales de la base ventricular, es prácticamente mínimo en comparación con el que se efectúa con los movimientos longitudinales. Hecho que se abordará más detalladamente a continuación (2).

3.3.5-La problemática planteada por la dilatación ventricular

La observación directa o indirecta (pruebas de imagen) del corazón humano latiendo, confirma que en su mayoría, la expulsión y la succión de la sangre depende, fundamentalmente, de los movimientos longitudinales del corazón: acortamiento o retracción y alargamiento o elongación. Igualmente, si se compara el cambio de tamaño experimentado por la masa ventricular durante los movimientos cardíacos transversales y longitudinales, se ratifica que el volumen de sangre succionado o expulsado en cada latido cardíaco está supeditado en una cuarta parte a los movimientos transversales, y en tres cuartas partes a los movimientos longitudinales (2).

Ahora bien, aunque la interpretación clásica de la mecánica cardíaca fue capaz de explicar la fase de eyección como resultado de la contracción ventricular, no consiguió dar una explicación plausible de cómo se generaba la fase posterior, conocida como fase de dilatación. Para que se produzca la succión de la sangre desde las aurículas hacia los ventrículos, se requiere una presión negativa (2). Según Torrent-Guasp (23,24) la energía que requeriría este proceso, sería atribuible únicamente a una contracción muscular. Dicho fenómeno resultaba incomprensible para otros autores que cuestionaban ¿Cómo puede ser que la dilatación ventricular se origine a partir de una contracción, hecho que implica retracción y disminución de tamaño? La pregunta obtendría su respuesta gracias a los estudios realizados por Torrent-Guasp, cuyos resultados se explican a continuación (2).

3.3.6-Expulsión y succión ventricular

Como es sabido, la anatomía dicta la función. En este caso, la configuración anatómica helicoidal descrita por el Dr. Torrent-Guasp junto al conocimiento de la secuencia de contracción de la misma, contribuyen a la explicación de la doble función ventricular (expulsión y succión de la sangre) y a la explicación de los movimientos de rotación de las capas ventriculares (torsión y destorsión ventricular) (2,9,25). Por lo tanto, una vez estudiada la anatomía de la banda, Torrent-Guasp predijo una mecánica miocárdica, previamente a la aparición de las primeras descripciones de resonancia magnética, pero absolutamente coherente con las posteriores imágenes obtenidas. Sugirió que el miocardio ventricular funciona como una unidad agonista-antagonista, siendo el segmento descendente la unidad agonista responsable de la sístole, y el segmento ascendente la unidad antagonista responsable de la diástole (11,19,26-28).

El estrechamiento ventricular

Cuando se inicia un nuevo ciclo y el corazón está en reposo, se produce en primer lugar la contracción del segmento derecho de la lazada basal y a continuación la contracción del segmento izquierdo (sucesión de contracciones debido a la relación de continuidad existente entre ambos segmentos) (2).

Con la contracción de los segmentos derecho e izquierdo de la lazada basal, las paredes de ambos ventrículos se tornan rígidas, reduciendo el diámetro transversal de las cavidades ventriculares (estrechamiento). Por lo tanto, la lazada basal se transforma en una rígida coraza externa (externa porque la lazada basal rodea a la lazada apexiana) (2).

El acortamiento ventricular

Una vez contraída la lazada basal, se produce la contracción de la lazada apexiana, contrayéndose en primer lugar el segmento descendente. La contracción secuencial de este segmento tiene un doble efecto (2):

- **Acortamiento del eje longitudinal**: la base ventricular desciende hacia el ápex, reduciendo el volumen y la capacidad ventricular.
- **Torsión ventricular**: el ápex rota hacia la izquierda (sentido antihorario) y la base hacia la derecha (sentido horario).

El acortamiento, la torsión ventricular y en menor medida el estrechamiento ventricular, son los movimientos causantes de la fase de eyección (sístole), responsable de la expulsión de la sangre hacia las grandes arterias (2).

El alargamiento ventricular

Una vez contraído el segmento descendente, se genera la contracción del segmento ascendente, provocando un doble efecto (2):

- **Alargamiento del eje longitudinal**: ascenso de la base ventricular, aumentando el volumen y la capacidad ventricular.
- **Destorsión ventricular**: el ápex rota hacia la derecha (sentido horario) y la base hacia la izquierda (sentido antihorario).

Leyendo este apartado, es normal que al lector le surjan un gran número de preguntas acerca de cómo es posible que la contracción de un segmento, en este caso el

ascendente, pueda provocar la elongación del eje longitudinal de los ventrículos. Torrent-Guasp propuso dos modelos que ayudan a responder a esta pregunta:

Por un lado, durante la contracción del segmento descendente, el segmento ascendente se ve forzado a adoptar una configuración en forma de S tumbada. A su vez, la contracción del segmento ascendente cambia esta conformación a una S extendida, ocasionando el ascenso de la base y por ende la elongación del eje largo de los ventrículos. Este mecanismo es similar al utilizado por las serpientes, que mediante la contracción de su musculatura son capaces de alargar y mover hacia arriba su estructura corporal, creciendo por lo tanto en altura (9). (Fig 9)

Por otro lado, Torrent-Guasp comparó el funcionamiento agonista-antagonista (segmento descendente-segundo ascendente) del miocardio ventricular, respectivamente, con la musculatura flexora-extensora del antebrazo. Cuando se contrae la musculatura flexora del antebrazo se produce un acortamiento (con flexión de la mano), similar al efecto que produce la contracción del segmento descendente en los ventrículos. Mientras que la contracción de la musculatura extensora genera un alargamiento (con elongación de la mano), similar al alargamiento ventricular que genera la contracción del segmento ascendente (11). (Fig 10)

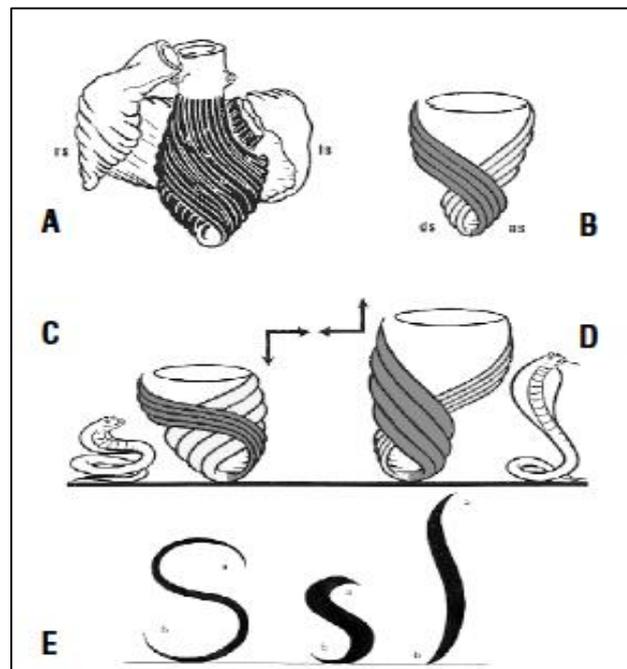


Figura 9. Similitud entre la contracción de la lazada apexiana y la contracción de la musculatura dorsal de las serpientes (9).

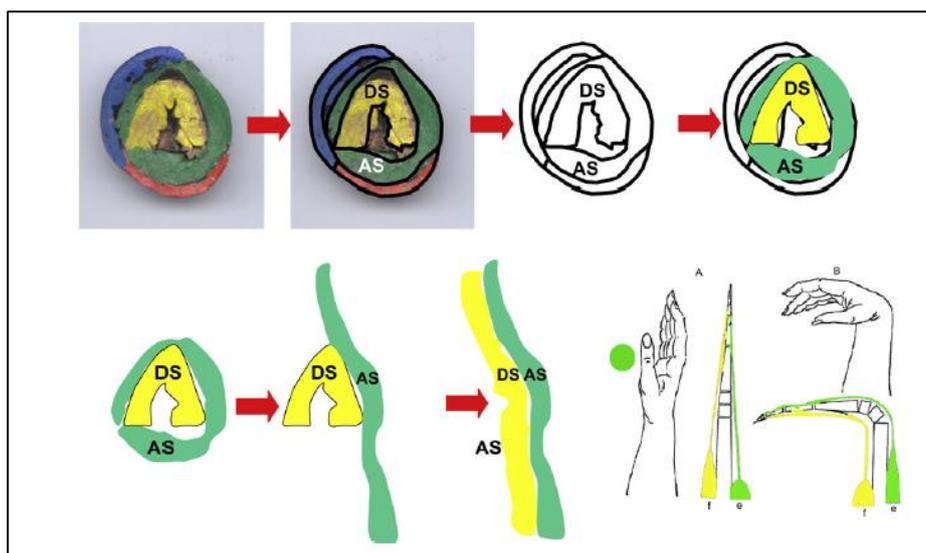


Figura 10. Similitud entre la contracción de la lazada apexiana y la contracción de la musculatura flexora-extensora del antebrazo (11).

Así mismo, el mecanismo subyacente de la función ventricular se puede comparar con el de un motor de combustión. El cilindro del motor estaría representado por la lazada basal, mientras que el pistón del motor correspondería a la lazada apexiana de la banda. Aunque ambas estructuras presentan correspondencia en términos morfológicos, hay una diferencia fundamental en la forma en que el corazón y el motor de combustión llevan a cabo sus funciones. En el motor de combustión, es el cilindro el que se encuentra inmóvil y el pistón el elemento que se mueve durante cada ciclo de trabajo. En el corazón, el cilindro es el que se desliza hacia arriba y hacia abajo sobre el pistón fijo, en cada ciclo cardíaco (2,9,17-19).

El ensanchamiento ventricular

Durante la contracción del segmento descendente, las fibras ventriculares experimentan una torsión sistólica que genera energía potencial. Esta energía se almacena al inicio de la diástole y se libera cuando las fibras se destorsionan, como si de una bobina comprimida que se abre se tratase. La destorsión, además de producir que el ápex se expanda, genera un gradiente de presión intraventricular que ayuda a que el llenado ventricular se produzca a baja presión (succión). Por lo tanto, el alargamiento, la destorsión y en menor medida el ensanchamiento ventricular, son los factores que contribuyen a la entrada de la sangre procedente de las aurículas (diástole) (29).

Se considera que el ensanchamiento ventricular se debe a la contracción de fibras aberrantes cuyo origen se localiza en el segmento ascendente de la lazada apexiana. Estas fibras, las cuales no han sido mencionadas hasta el momento, se desvían al llegar

al surco interventricular anterior, tapizando la pared libre del ventrículo derecho y posteriormente la del ventrículo izquierdo, al sobrepasar el surco interventricular posterior. Insertándose finalmente en los anillos de la arteria aorta y pulmonar, así como, en los anillos del orificio mitral y tricúspide, recubriendo todo el perímetro de la lazada basal. La contracción de dichas fibras provoca el desplazamiento hacia los lados de las paredes libres de los ventrículos derecho e izquierdo, ensanchando las cavidades ventriculares. Pero como se ha mencionado previamente, debido a su magnitud relativamente escasa, el ensanchamiento ventricular tiene menos importancia de la que se le ha atribuido tradicionalmente (2,15,30).

Resumiendo, la contracción de la banda miocárdica se produciría en el siguiente orden: pared libre del ventrículo derecho (segmento derecho) → pared libre del ventrículo izquierdo (segmento izquierdo) → segmento descendente → segmento ascendente. Además, Fourier y otros autores, confirmaron mediante estudios isotópicos con microcristales una secuencia de activación mecánica desde la lazada basal hacia la apexiana (9).

3.4-Técnicas de imagen cardíaca

Las técnicas de imagen permiten comprobar la existencia de los movimientos transversales y longitudinales ventriculares descritos por la banda miocárdica durante cada ciclo cardíaco. Concretamente, las técnicas más utilizadas para valorar la función cardíaca son la ecocardiografía bidimensional y las secuencias de cine de resonancia magnética cardíaca (31).

Además, existen técnicas de imagen especiales que permiten analizar también la torsión ventricular, ya que detectan cómo el ápex y la base giran en sentido contrario:

- Ecocardiografía *speckle tracking* o *strain* 2D: las nuevas técnicas de *speckle tracking* permiten evaluar el movimiento del miocardio a partir de imágenes ultrasónicas bidimensionales (*strain* 2D), prescindiendo de fenómenos *Doppler*. De esta forma, se puede obtener una valoración directa y más precisa del movimiento cardíaco (31). El análisis del movimiento cardíaco del *strain* 2D se basa en el seguimiento de marcadores acústicos naturales, también llamados *speckles*, a lo largo del ciclo cardíaco. Gracias a esta técnica, es posible medir la deformación del miocardio a nivel longitudinal, radial y circunferencial (32). Es posible obtener la rotación de la base y la rotación del ápex a partir de registros de *strain* circunferencial. Actualmente, se trata del *gold standard* para valorar dicha torsión (33).

- Resonancia magnética cardíaca marcada (*tagging*): el patrón de torsión ventricular se obtuvo mediante resonancia magnética cardíaca marcada, con los primeros estudios que empezaban a utilizar técnicas de imagen. Esta técnica superpone a la imagen una rejilla que se deforma en función del movimiento (27).
- Resonancia magnética cardíaca *feature tracking*: en sus inicios, la evaluación de la deformación miocárdica por resonancia magnética se llevaba a cabo mediante técnicas de *tagging*. Sin embargo, en la actualidad se emplea el *feature tracking* para este propósito (34). Es posible obtener parámetros de deformación similares a los obtenidos mediante *speckle tracking* a partir de imágenes convencionales de SSFP (*steady state free precession*). La ventaja de utilizar imágenes de resonancia magnética es que estas tienen mejor calidad, aunque se reduzca la resolución temporal (35). Esta técnica rastrea *features* en las secuencias SSFP de la resonancia magnética, del mismo modo que la ecocardiografía *speckle tracking* rastrea *speckles* (36).

3.5-Controversias. La teoría de la banda miocárdica al debate

Existen dos escuelas contemporáneas opuestas acerca de la estructura del miocardio ventricular: HVMB, *The helical ventricular myocardial band of Torrent-Guasp* y FSM, *Functional Syncytial Mesh* (13).

Según el modelo de la FSM, los cardiomiocitos se disponen de manera radial y longitudinal, con cambios en las angulaciones según la profundidad del miocardio. Además establece una relación entre esta distribución arquitectónica y sus consecuencias funcionales. El modelo de la HVMB sostiene una disposición anatómica helicoidal y continua de las fibras del miocardio ventricular. Arquitectura que explicaría la torsión ventricular (18,37,38).

La teoría de la FSM se opone al modelo de la banda miocárdica por los siguientes motivos:

- Desde el punto de vista anatómico:

Algunos autores como Lev y Simpkins (39) destacaron, en 1965, que bajo las condiciones empleadas por Torrent-Guasp, el miocardio ventricular puede ser disecado casi a voluntad del anatomista. La pregunta que se plantearon fue si Torrent-Guasp reproducía la banda de acuerdo con sus propias concepciones preconcebidas o sobre la base de las técnicas aceptadas para la disección anatómica.

Tanto Torrent-Guasp como los autores defensores del modelo de la FSM coinciden en que a nivel histológico existe una triple orientación de las fibras en el espesor miocárdico: el subepicardio se corresponde con una hélice orientada hacia la izquierda que en el mesocardio se hace circunferencial, cambiando en el subendocardio a una hélice orientada hacia la derecha. Pero los autores propulsores del modelo de la FSM discrepan con Torrent-Guasp en que el cambio de orientación que experimentan las fibras es gradual y no brusco, como se esperaría con la superposición de los segmentos de la banda (14).

- Desde el punto de vista funcional:

Mediante ecocardiografía se observa cierta heterogeneidad dentro de la pared del ventrículo izquierdo. La imagen ecocardiográfica del ventrículo izquierdo muestra la presencia de una zona hiperecogénica en la pared media del septo y en gran parte de la circunferencia ventricular. En un primer momento, esta zona se había considerado como prueba de la existencia de un plano de clivaje entre los elementos de la banda miocárdica. Pero un reciente estudio ha demostrado que dicha región es la consecuencia del reflejo de los ultrasonidos de cardiomiocitos orientados en una dirección ortogonal en relación con el haz ultrasónico. La ecocardiografía muestra la presencia de una zona intermedia mural en contracción que refleja cardiomiocitos orientados circunferencialmente. Hallazgos incompatibles con la banda miocárdica (40,41).

La imagen de resonancia magnética con tensor de difusión es un método que evalúa la difusión del hidrógeno unido al agua en los tejidos, recientemente se ha utilizado para estudiar la anatomía miocárdica. Debido a que la difusión del agua ocurre principalmente a lo largo del eje longitudinal de los cardiomiocitos, su dirección se considera un subrogado de la alineación promedio de los mismos. Esta técnica de imagen corrobora la existencia de una triple orientación de las fibras en el espesor miocárdico, descrita previamente por estudios histológicos. Del mismo modo que apoya a la teoría de la FSM en que el cambio de orientación de las fibras es gradual y no brusco (40). Por último, las imágenes resultantes de la utilización de esta técnica no reflejan la banda miocárdica tal como la describe Torrent-Guasp, a excepción de los estudios realizados por Poveda *et al* (37). Por ejemplo, la mayoría de los estudios que hasta la fecha han utilizado resonancia magnética objetivan la ausencia de una parte de la lazada apical, así como que la lazada basal no siempre se encuentra en la base del ventrículo izquierdo, no respaldando el concepto de la banda miocárdica (40-43).

Debido a la orientación de las fibras miocárdicas, la contracción de la mayoría de los cardiomiocitos resulta en una combinación de acortamiento longitudinal y circunferencial ventricular. Este acortamiento unido al desplazamiento del anillo mitral, produce una reducción en el volumen total del ventrículo izquierdo. Esta deformación longitudinal y circunferencial aumenta el espesor de la pared del ventrículo izquierdo,

resultando en un mayor volumen de sangre eyectado y, por lo tanto, en una mayor fracción de eyección ventricular izquierda. Secuencia de sucesos que permiten a la teoría de la FSM explicar la fase sistólica (40,44).

Como bien sabemos, la banda miocárdica explica la fase de eyección ventricular como resultado de los movimientos de acortamiento, torsión y en menor medida estrechamiento ventricular. Mediante ecocardiografía *speckle tracking*, se puede observar la torsión ventricular descrita por la banda miocárdica. Sin embargo, los defensores del modelo de la FSM sugieren que dicho movimiento es una consecuencia del cizallamiento de la contracción de los cardiomiocitos dispuestos tridimensionalmente y que no debe confundirse con una medida directa de la función cardíaca. Además de que se trata de un movimiento relativamente menor en comparación con el acortamiento longitudinal y circunferencial ventricular, sugiriendo que la torsión ventricular es un contribuyente relativamente menor al volumen de eyección. Por lo tanto, defienden que la torsión ventricular se explica fácilmente por las disposiciones anatómicas de los cardiomiocitos, no siendo necesario invocar el concepto de una banda miocárdica única para explicar esta observación (40,45).

Por último, defienden que el modelo de la FSM proporcionaría tensiones y deformaciones de los cardiomiocitos más uniformes en comparación con el concepto de la banda miocárdica (40).

El modelo de la banda miocárdica se opone a la teoría de la FSM por los siguientes motivos:

Los defensores de la banda miocárdica respaldan que la teoría de la FSM explica adecuadamente la estructura y la función ventricular a escala microscópica pero nunca a nivel macroscópico, es decir, nunca a nivel del corazón como órgano. Un claro ejemplo se vería reflejado en que, como se ha mencionado previamente, la teoría de la FSM es capaz de explicar la fase sistólica a través de la contracción de los cardiomiocitos, los cuales por su disposición espacial provocan un acortamiento longitudinal y circunferencial ventricular, sin conseguir llegar a explicar la fase diastólica como lo logra la banda miocárdica (13).

Se han desarrollado modelos matemáticos que descomponen el movimiento del corazón en vectores, los cuales respaldan el modelo de la banda miocárdica. Concretamente, se puede simplificar en cuatro vectores, cuyo movimiento corresponde al asociado a cada uno de los cuatro segmentos de la banda. Además, si nos fijamos en su orientación predominante tridimensional, vemos que se agrupan de dos en dos, correspondiendo a la lazada basal (movimiento en el plano horizontal) y a la apexiana (movimiento en el plano vertical). (Fig 11). Por lo tanto, el concepto de HVMB define los principales vectores

acumulativos integrando la arquitectura tisular (forma) y las fuerzas netas desarrolladas (función) en la masa ventricular en un único vector helicoidal tridimensional (13,46,47).

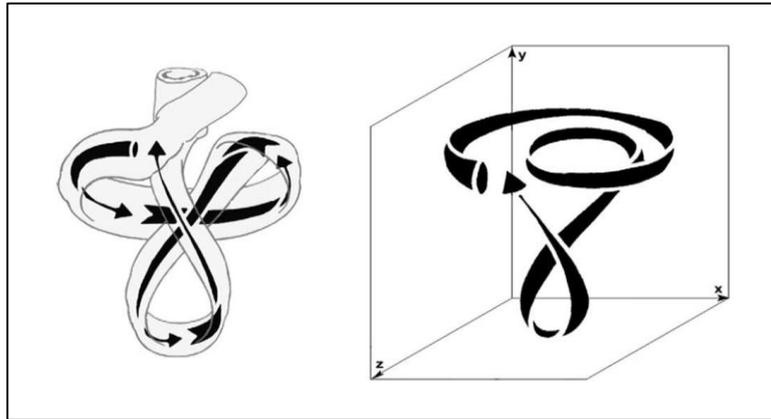


Figura 11. Representación de los cuatro vectores desarrollados por modelos matemáticos (modificado de 13).

4-Conclusiones

- La banda miocárdica se divide en una lazada basal y en una lazada apexiana. La lazada basal se divide en un segmento derecho y en otro izquierdo. La lazada apexiana se divide en un segmento descendente y en otro ascendente.
- La progresión axial de los estímulos eléctricos a lo largo de la banda miocárdica ocurre en dirección subepicardio (lazada basal) – subendocardio (lazada apexiana). A excepción de la cara anterior del ventrículo izquierdo, donde la difusión ocurre en dirección subendocardio (segmento descendente) – subepicardio (segmento ascendente).
- La banda miocárdica describe cuatro movimientos ventriculares durante cada ciclo cardíaco: estrechamiento, acortamiento, alargamiento y ensanchamiento.
- La mecánica cardíaca clásica considera que los movimientos transversales (estrechamiento y ensanchamiento) ventriculares tienen mayor importancia cuantitativa que los movimientos longitudinales.
- Torrent-Guasp demuestra que los movimientos longitudinales (acortamiento y alargamiento) de los ventrículos presentan una mayor importancia cuantitativa que los movimientos transversales.

- La contracción de la banda miocárdica sigue el siguiente orden: segmento derecho → segmento izquierdo → segmento descendente → segmento ascendente.
- El ápex se mantiene prácticamente inmóvil, desplazándose mínimamente en comparación con el desplazamiento efectuado por la base ventricular. Los cambios en el volumen de las cavidades ventriculares dependen del ascenso y descenso de la base ventricular y no del ápex.
- Torrent-Guasp sugirió que el miocardio ventricular funciona como una unidad agonista-antagonista, siendo el segmento descendente la unidad agonista y el segmento ascendente la unidad antagonista.
- La mecánica cardíaca clásica explica la fase de eyección como resultado de la contracción ventricular, pero no es capaz de explicar la succión de la sangre desde las aurículas, ya que la considera como resultado de la dilatación ventricular sin atribuirle a una contracción generadora de presión negativa.
- La banda miocárdica explica la fase de eyección ventricular (sístole) como resultado de los movimientos de acortamiento, torsión y en menor medida estrechamiento ventricular. Siendo los dos primeros resultado de la contracción del segmento descendente, y el último de la contracción de la lazada basal.
- La banda miocárdica explica la fase de succión ventricular (diástole) como resultado de la contribución de los movimientos de alargamiento, destorsión y en menor medida ensanchamiento ventricular. Siendo los dos primeros resultado de la contracción del segmento ascendente, y el último de la contracción de las fibras aberrantes.

5-Referencias bibliográficas

1. Streeter DD, Powers WE, Ross MA, Torrent-Guasp F, Baan J, Noordergraaf A, et al. Three-dimensional fiber orientation in the mammalian left ventricular wall. *Cardiovasc Syst Dyn.* 1978; 73-84.
2. Torrent-Guasp F. Estructura y función del corazón. *Rev Esp Cardiol.* 1998; 51: 91-102.
3. Torrent-Guasp F. El ciclo cardíaco. Madrid: Espasa-Calpe; 1954.

4. Brecher GA. Venous return. Nueva York: Grune & Stratton; 1956.
5. Brecher GA. Experimental evidence of ventricular diastolic function. *Circ Res.* 1956; 4: 513-8.
6. Brecher GA. Critical review of recent works on ventricular diastolic suction. *Circ Res.* 1958; 6: 554-66.
7. Oliete S, Herraiz F. Filmaciones montadas con imágenes obtenidas mediante resonancia magnética de corazones normales latiendo. Madrid: Hospital Ruber Internacional; 1997.
8. Cox JL, Buckberg GD, John P, Kocica M, Suma H. Francisco Torrent-Guasp (1931-2005). *Rev Esp Cardiol.* 2005; 58 (6): 759-60.
9. Torrent-Guasp F, Ballester M, Buckberg GD, Carreras F, Flotats A, Carrió I, et al. Spatial orientation of the ventricular muscle band: Physiologic contribution and surgical implications. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2001; 122 (2): 389-92.
10. Marinelli R, Fuerst B, Van Der Zee H, McGinn A. The Heart Is Not a Pump. *Frontier Perspectives.* 1995; 5: 1-12.
11. Ballester M, Ferreira A, Carreras F. The Myocardial Band. *Heart Failure Clin.* 2008; 4 (3): 261-72.
12. Trainini J, Herreros J, Elenchwajg B, Trainini A, Lago N. Disección del Miocardio. *Rev Argent Cardiol.* 2017; 85 (1): 44-55.
13. Kocica MJ, Corno AF, Carreras-Costa F, Ballester-Rodes M, Moghbel MC, Cueva CNC, et al. The helical ventricular myocardial band: global, three-dimensional, functional architecture of the ventricular myocardium. *Eur J Cardio-thoracic Surg* 29S. 2006; 21-40.
14. MacIver DH, Stephenson RS, Jensen B, Agger P, Sánchez-Quintana D, Jarvis JC, et al. The end of the unique myocardial band: Part I. Anatomical considerations. *Eur J Cardio-thoracic Surg.* 2018; 53(1): 112-9.
15. Torrent-Guasp F. Anatomía Funcional del Corazón. La actividad ventricular diastólica y sistólica. Madrid: Paz Montalvo; 1957.
16. Torrent-Guasp F, Kocica MJ, Corno AF, Komeda M, Carreras-Costa F, Flotats A, et

- al. Towards new understanding of the heart structure and function. *Eur J Cardiothorac Surg*. 2005; 27: 191-201.
17. Torrent-Guasp F, Kocica MJ, Corno A, Komeda M, Cox J, Flotats A, et al. Systolic ventricular filling. *Eur J Cardio-thoracic Surg*. 2004; 25 (3): 376-86.
 18. Torrent-Guasp F. La mecánica agonista-antagonista de los segmentos descendente y ascendente de la banda miocárdica ventricular. *Rev Esp Cardiol*. 2001; 54 (9): 1091-102.
 19. Torrent-Guasp F, Buckberg GD, Clemente C, Cox JL, Coghlan HC, Gharib M. The structure and function of the helical heart and its buttress wrapping. I. The normal macroscopic structure of the heart. *Semin Thorac Cardiovasc Surg*. 2001; 13 (4): 301-19.
 20. Robb y Robb, citado por Wiggers CJ. *Fisiología normal y patológica*. Madrid: Espasa-Calpe; 1949.
 21. Robb J Sands y Robb RC. *Am J Physiol*. 1936; 115: 43.
 22. Armour JA, Randall WC. *American Journal of Physiology*. 1970; 218: 1710-7.
 23. Torrent-Guasp F. La estructuración macroscópica del miocardio ventricular. *Rev Esp Cardiol*. 1980; 133: 265-87.
 24. Torrent-Guasp F. Comentarios sobre la forma y la función del corazón. *Clin Cardiovasc*. 1982; 1: 85-8.
 25. Torrent-Guasp F, Ballester M, Samuels L, Narula J. Spatial orientation of the ventricular muscle band and approach to partial ventriculotomy in heart failure. In: Narula J, Ballester M, Carrió I, Virmani R, Willerson J, editors. *Pathogenetic basis of myocardial disorders*. Londres: ISIS Publishers. In press.
 26. Lorenz CH, Pastorek JS, Bundy JM. Delineation of normal left ventricular twist throughout systole by tagged cine magnetic resonance imaging. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2000; 2: 97-108.
 27. Moore CC, Lugo-Olivieri CH, McVeigh ER, et al. Three-dimensional systolic strain patterns in the normal human left ventricle: characterization with tagged MR imaging. *Radiology*. 2000; 214: 453-66.

28. Henson RE, Song SK, Pastorek JS, et al. Left ventricular torsion is equal in mice and humans. *Am J Pathol.* 2000; 278: 1117-23.
29. Bas M van Dalen et al. Delayed Left Ventricular Untwisting in Hypertrophic Cardiomyopathy. *J Am Soc Echocardiograph.* 2009; 22: 1320-6.
30. Torrent-Guasp F, Zarco P. Lunkenheimer PP, Aragoncillo P, Fariña J, Streeter DD, et al. *Estructura y mecánica del corazón.* Barcelona: Grass Ediciones; 1987.
31. Arco J Teske et al. Echocardiographic quantification of myocardial function using tissue deformation imaging, a guide to image acquisition and analysis using tissue Doppler and speckle tracking. *Cardiovascular Ultrasound.* 2007; 5: 27.
32. James D. Thomas et al. Assessment of Left Ventricular Function by Cardiac Ultrasound. *J Am Coll Cardiol.* 2006; 48: 2015-25.
33. Brage H Amundsen et al. Noninvasive Myocardial Strain Measurement by Speckle Tracking Echocardiography. Validation Against Sonomicrometry and Tagged Magnetic Resonance Imaging. *J Am Coll Cardiol.* 2006; 47: 789-93.
34. Hinojar R et al. Prognostic implications of global myocardial mechanics in hypertrophic cardiomyopathy by cardiovascular magnetic resonance feature tracking. Relations to left ventricular hypertrophy and fibrosis. *Int J Cardiol.* 2017; 249: 467-72.
35. Gianni Pedrizzetti et al. Principles of cardiovascular magnetic resonance feature tracking and echocardiographic speckle tracking for informed clinical use. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance.* 2016; 18: 51.
36. Matthias Aurich et al. Left ventricular mechanics assessed by two-dimensional echocardiography and cardiac magnetic resonance imaging: comparison of high-resolution speckle tracking and feature tracking. *European Heart Journal Cardiovascular Imaging.* 2016; 17: 1370-8.
37. Poveda F, Gil D, Martí E, Andaluz A, Ballester M, Carreras F. Estudio tractográfico de la anatomía helicoidal del miocardio ventricular mediante resonancia magnética por tensor de difusión. *Rev Esp Cardiol.* 2013; 66 (10): 782-90.
38. Carreras F, Garcia-Barnes J, Gil D, Pujadas S, Li C, Suarez-Arias R, et al. Left ventricular torsion and longitudinal shortening: two fundamental components of myocardial mechanics assessed by tagged cine-MRI in normal subjects. *Int J*

Cardiovasc Imag. 2011; 28: 273-84.

39. Lev M, Simkins CS. Architecture of the human ventricular myocardium; technic for study using a modification of the Mall-MacCallum method. *Lab Invest.* 1956; 5: 396-409.
40. MacIver DH, Partridge JB, Agger P, Stephenson RS, Boukens BJD, Omann C, et al. The end of the unique myocardial band: Part II. Clinical and functional considerations. *Eur J Cardio-thoracic Surg.* 2018; 53 (1): 120-8.
41. Agger P, Stephenson RS, Dobrzynski H, Atkinson A, Iaizzo PA, Anderson RH, et al. Insights from echocardiography, magnetic resonance imaging, and microcomputed tomography relative to the mid-myocardial left ventricular echogenic zone. *Echocardiography.* 2016; 33: 1546-56.
42. Smerup M, Nielsen E, Agger P, Frandsen J, Vestergaard-Poulsen P, Andersen J, et al. The three-dimensional arrangement of the myocytes aggregated together within the mammalian ventricular myocardium. *Anat Rec.* 2009; 292: 1-11.
43. Schmid P, Jaermann T, Boesiger P, Niederer PF, Lunkenheimer PP, Cryer CW, et al. Ventricular myocardial architecture as visualised in postmortem swine hearts using magnetic resonance diffusion tensor imaging. *Eur J Cardiothorac Surg.* 2005; 27: 468-72.
44. MacIver DH. The relative impact of circumferential and longitudinal shortening on left ventricular ejection fraction and stroke volume. *Exp Clin Cardiol.* 2012; 17: 5-11.
45. Partridge JB, Smerup MH, Petersen SE, Niederer PF, Anderson RH. Linking left ventricular function and mural architecture: what does the clinician need to know?. *Heart.* 2014; 100: 1289-98.
46. Kohl P, Noble D, Winslow R, Hunter PJ. Computational modelling of biological systems: tools and visions. *Phil Trans R Soc Lond A.* 1776; 358: 579-610.
47. Spach MS, Heidlage JF. The stochastic nature of cardiac propagation at a microscopic level. Electrical description of myocardial architecture and its application to conduction. *Circ Res.* 1995; 76: 366-80.