

Influencia del tipo de registro (unipolar o bipolar) en las características espectrales de los registros epicárdicos de la fibrilación ventricular. Estudio experimental

Francisco J. Chorro^{a,b}, Juan Guerrero^c, Francisca Pelechano^d, Isabel Traperó^e, Luis Mainar^a, Joaquín Cánoves^a, Luis Such-Miquel^f, Arcadio García-Alberola^g, Ángel Ferrero^a, Juan Sanchís^{a,b}, Vicente Bodía^{a,b}, Antonio Alberola^d y Luis Such^d

^aServicio de Cardiología. Hospital Clínico Universitario de Valencia. Valencia. España.

^bDepartamento de Medicina. Universidad de Valencia. Valencia. España.

^cDepartamento de Electrónica. Universidad de Valencia. Valencia. España.

^dDepartamento de Fisiología. Universidad de Valencia. Valencia. España.

^eDepartamento de Enfermería. Universidad de Valencia. Valencia. España.

^fDepartamento de Fisioterapia. Universidad de Valencia. Valencia. España.

^gServicio de Cardiología. Hospital Virgen de la Arrixaca. Murcia. España.

Introducción y objetivos. Se evalúa la hipótesis de que el tipo de registro (unipolar o bipolar) influye en la información obtenida mediante técnicas espectrales durante la fibrilación ventricular en un modelo experimental que utiliza electrodos epicárdicos.

Métodos. En 29 corazones aislados de conejo se obtienen registros de la fibrilación ventricular con un electrodo múltiple situado en la pared libre del ventrículo izquierdo. Se comparan los parámetros obtenidos en el dominio de la frecuencia (análisis de Fourier) al utilizar electrodos unipolares o bipolares con varias separaciones entre los electrodos en distintas direcciones (horizontal, vertical o diagonales).

Resultados. La modalidad de registro (unipolar o bipolar) y la separación entre los electrodos han introducido diferencias significativas en la frecuencia media ($p < 0,0001$) y en la energía normalizada del espectro alrededor de la frecuencia dominante (± 1 Hz) ($p < 0,05$), pero éstas han sido mínimas al considerar la frecuencia dominante. En el análisis espectral cruzado, se ha observado que la coherencia entre los registros unipolares disminuye al aumentar la separación entre los electrodos, mientras que ocurre lo contrario al analizar la coherencia entre los unipolares y los bipolares. Ambas coherencias se correlacionan inversamente, de tal modo que cuanto mayor es la primera menor es la de los unipolares respecto a los bipolares ($r = 0,29$; $p < 0,0001$; $n = 348$).

Conclusiones. El tipo de registro utilizado (unipolar o bipolar) introduce variaciones en la información obtenida

mediante técnicas espectrales en los registros epicárdicos de la fibrilación ventricular. Estas diferencias se observan en la frecuencia media y en la distribución de frecuencias del espectro, pero son muy pequeñas al considerar la frecuencia dominante.

Palabras clave: Fibrilación ventricular. Análisis de Fourier. Electrofisiología. Registros unipolares y bipolares.

Influence of Recording Mode (Unipolar or Bipolar) on the Spectral Characteristics of Epicardial Recordings in Ventricular Fibrillation. An Experimental Study

Introduction and objectives. The aim of this study was to examine the hypothesis that the recording mode (i.e., unipolar or bipolar) affects the information obtained using spectral analysis techniques during ventricular fibrillation by carrying out an experiment using epicardial electrodes.

Methods. Recordings of ventricular fibrillation were obtained in 29 isolated rabbit hearts using a multiple-electrode probe located on the left ventricular free wall. The parameter values obtained in the frequency domain (by Fourier analysis) using unipolar or bipolar electrodes, different interelectrode distances, and different orientations (i.e., horizontal, vertical or diagonal) were compared.

Results. Changing the recording mode (i.e., unipolar to bipolar) or the interelectrode distance significantly altered the mean frequency ($P < .0001$) and the normalized energy of the spectrum (± 1 Hz) around the dominant frequency ($P < .05$), though the changes were small relative to the dominant frequency. Cross-spectral analysis showed that the coherence between unipolar recordings decreased as the interelectrode distance increased, while the opposite occurred with the coherence between unipolar and bipolar recordings. The two coherences were inversely correlated such that the greater the former coherence, the less the coherence between unipolar and bipolar recordings ($r = 0.29$; $P < .0001$; $n = 348$).

Este trabajo se ha financiado con las ayudas del Instituto de Salud Carlos III del Ministerio de Sanidad y Consumo PI06/0758 y RETIC RD06/0003/0010 (REDINSCOR), y la beca B2005 de la Sociedad Española de Cardiología.

Correspondencia: Dr. F.J. Chorro.
Servicio de Cardiología. Hospital Clínico Universitario.
Avda. Blasco Ibáñez, 17. 46010 Valencia. España.
Correo electrónico: Francisco.J.Chorro@uv.es

Recibido el 16 de febrero de 2007.

Aceptado para su publicación el 26 de junio de 2007.

Conclusions. The recording mode (i.e., unipolar or bipolar) used influenced the information obtained using spectral analysis techniques from epicardial recordings of ventricular fibrillation. Differences were observed in the mean frequency and in the frequency distribution, but they were very small relative to the dominant frequency.

Key words: *Ventricular fibrillation. Fourier analysis. Electrophysiology. Unipolar and bipolar recordings.*

Full English text available from: www.revespcardiol.org

ABREVIATURAS

EnN: energía normalizada del espectro en la banda $FrD \pm 1$ Hz.
FrD: frecuencia dominante.
FrM: frecuencia media.
FV: fibrilación ventricular.

INTRODUCCIÓN

El análisis espectral de las señales registradas durante la fibrilación tanto auricular como ventricular proporciona información en el dominio de la frecuencia¹⁻⁹. Se ha estudiado la relación entre la frecuencia dominante de estas señales y los ciclos determinados por las activaciones locales consecutivas^{4,10-12}, y estas técnicas han ayudado a identificar heterogeneidades tanto espaciales como temporales en las frecuencias de activación durante los procesos fibrilatorios^{5,6,13,14}. Asimismo su utilización, complementada o no con técnicas cartográficas, ha permitido caracterizar las modificaciones de los patrones de activación inducidas por fármacos^{1-3,10,15}, la isquemia^{4,16-18} o agentes físicos, entre ellos las variaciones de la temperatura¹¹ o el estiramiento^{8,12,19}. En la clínica, las técnicas espectrales han sido ampliamente utilizadas en relación con diversos aspectos de la fibrilación ventricular (FV), como el desarrollo de algoritmos útiles para la identificación de la arritmia²⁰⁻²² o la predicción del éxito de las maniobras de reanimación tras la parada cardiaca por FV²³⁻²⁶. Recientemente se está empezando a utilizarlos para identificar lugares de interés sobre los que se podría actuar terapéuticamente en los procesos fibrilatorios^{13,14}.

El análisis en el dominio de la frecuencia ha planteado diversas cuestiones metodológicas relacionadas con las propias características del procedimiento^{9,27,28}. En relación con las señales obtenidas directamente desde el corazón, uno de los aspectos todavía no suficientemente estudiados es el de la influencia del tipo de registro (bipolar o unipolar) en la información obtenida²⁹. Las características de los electrogramas difieren al utilizar electrodos bipolares o unipolares, ya que en el primer caso la dirección de los frentes de activación, y por

lo tanto el desfase temporal entre las señales obtenidas con los dos electrodos del registro bipolar, determina la morfología de dichos electrogramas. En el segundo caso, los registros habitualmente contienen potenciales originados a distancia del lugar en que se sitúa el electrodo unipolar que no son generados por la activación local. En el presente estudio se pretende evaluar la hipótesis de que el tipo de electrodo utilizado para registrar los electrogramas (unipolar o bipolar) influye en la información obtenida con técnicas espectrales durante la FV. Para confirmar esta hipótesis se utiliza un modelo experimental con corazones aislados de conejo en el que, empleando electrodos múltiples epicárdicos, se analizan y comparan los parámetros obtenidos en el dominio de la frecuencia durante la FV tanto al utilizar electrodos unipolares como bipolares con distintas separaciones entre los electrodos.

MÉTODOS

Preparación experimental

Los procedimientos utilizados en este estudio se ajustan a las guías vigentes para el cuidado y la utilización de animales en los laboratorios de investigación. Se ha utilizado corazones aislados y perfundidos de conejos de raza Nueva Zelanda ($n = 29$; peso, $2,6 \pm 0,2$ kg). Tras anestesia (ketamina intramuscular a 25 mg/kg) y heparinización, se extrajo el corazón y se lo sumergió en Tyrode frío (4°C). Tras aislar la aorta, se conectó a un sistema de Langendorff para perfundir Tyrode a una presión de 60 mmHg y una temperatura de $37 \pm 0,5^\circ\text{C}$ (composición milimolar: NaCl, 130; NaHCO_3 , 24,2; KCl, 4,7; CaCl_2 , 2,2; NaH_2PO_4 , 1,2; MgCl_2 , 0,6; glucosa, 12). Para los registros se ha utilizado un electrodo múltiple con 121 electrodos (diámetro, 0,125 mm; distancia entre electrodos, 1 mm; disposición cuadrangular [11 11]) situado en el epicardio de la pared libre del VI, utilizando como electrodo indiferente una placa de Ag/AgCl situada sobre la aorta. La estimulación ventricular se ha efectuado utilizando un electrodo bipolar y un estimulador GRASS S88 con unidad de aislamiento de estímulos (SIU5). Los registros se han obtenido con un sistema de cartografía de la actividad eléctrica cardiaca (MAPTECH). Los electrogramas se han registrado en una banda de frecuencias entre 1 y 400 Hz (frecuencia de muestreo, 1 kHz). La FV se ha inducido mediante estimulación a frecuencias crecientes y se ha mantenido la perfusión durante la arritmia.

Datos analizados

Análisis espectral de los electrogramas durante la fibrilación ventricular

Se ha utilizado el método de Welch³⁰ para obtener el espectro de energía de las señales obtenidas con los

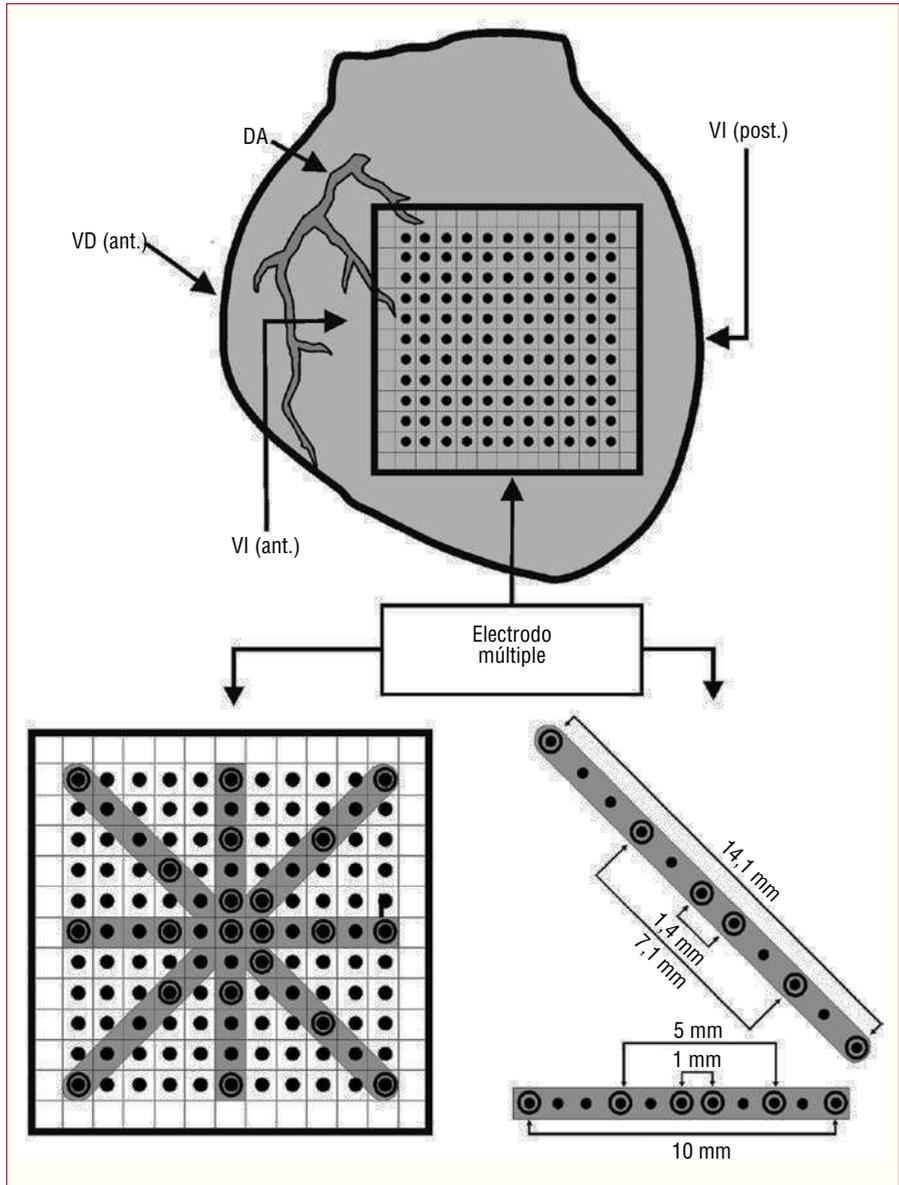


Fig. 1. Esquema de la preparación experimental y de los electrodos utilizados para realizar los registros bipolares cuyas separaciones se indican en la parte inferior derecha. ANT: anterior; DA: arteria descendente anterior; POST: posterior; VD: ventrículo derecho; VI: ventrículo izquierdo.

electrodos seleccionados de la matriz del electrodo múltiple, tanto en la modalidad unipolar como en la bipolar (fig. 1). Para las configuraciones bipolares, se eligió 3 distancias entre los electrodos (1, 5 y 10 mm) tanto en la dirección horizontal como en la vertical. También se ha analizado los registros obtenidos en las 2 diagonales (A: superior derecha-inferior izquierda, y B: superior izquierda-inferior derecha), y en este caso las distancias entre los electrodos fueron 1,4, 7,1 y 14,1 mm.

El análisis se efectuó utilizando bloques de 4.096 puntos sin acolchado de ceros⁹. Los datos se han procesado con Matlab en una plataforma Hewlett-Packard 712/80. Se determinaron los siguientes parámetros:

– FrD: frecuencia dominante o frecuencia (en Hz) del espectro de energía con la mayor amplitud.

– FrM: frecuencia media del espectro (en Hz).
 – EnN: energía normalizada del espectro contenida alrededor de la frecuencia dominante ($FrD \pm 1$ Hz) (unidades normalizadas respecto a la energía total).

Las determinaciones se han efectuado a partir de los registros obtenidos con los electrodos unipolares y bipolares, para las distintas separaciones y direcciones estudiadas. Asimismo, para comparar los registros unipolares y bipolares, se obtuvo el espectro cruzado a partir del cual se ha determinado la coherencia espectral, que representa la similitud para cada frecuencia entre los espectros de los 2 registros analizados (1 = similitud total y 0 = falta total de similitud).

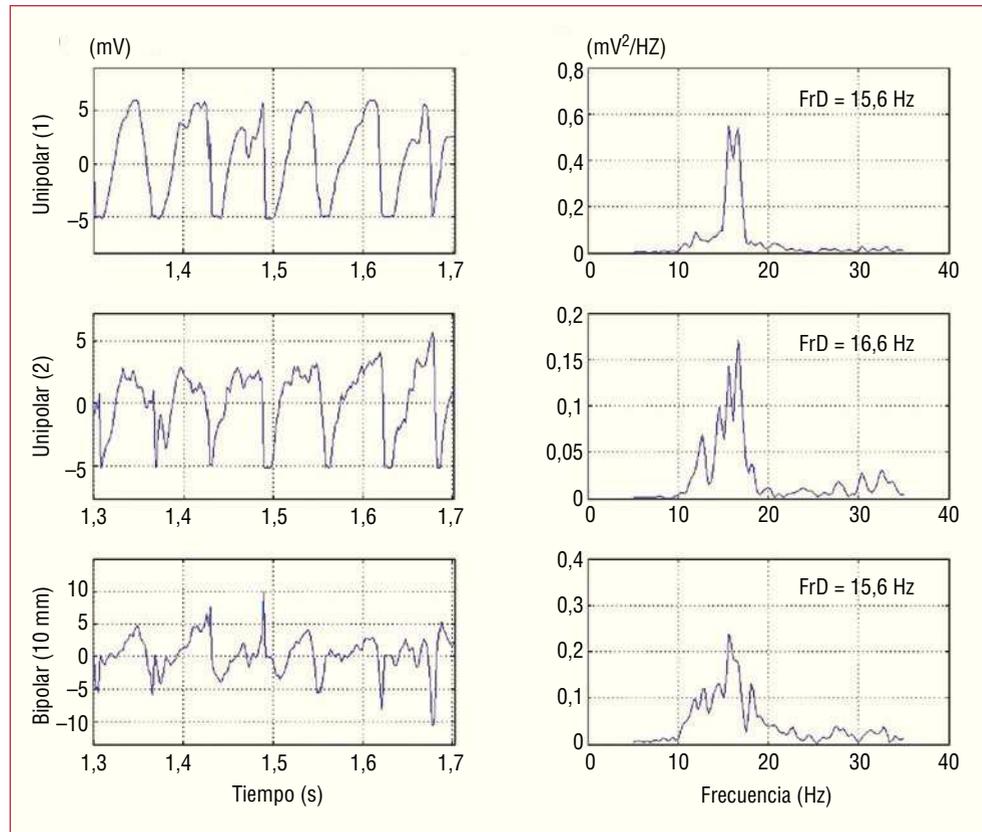


Fig. 2. Espectros de frecuencias (derecha) de las señales de la fibrilación ventricular (izquierda) registradas en uno de los experimentos con los electrodos unipolares y con el bipolar (separación, 10 mm; dirección horizontal). La frecuencia dominante (FrD) en los 3 registros es similar.

Análisis estadístico

Los datos se expresan como valores medios \pm 1 desviación estándar (DE). Las comparaciones entre los datos obtenidos con los electrodos unipolares y bipolares se han efectuado utilizando el modelo general lineal para medidas repetidas (paquete estadístico SPSS), considerando como factor intrasujetos la modalidad de registro. Se ha considerado significativas las diferencias con valores de $p < 0,05$. Las regresiones lineales se han efectuado mediante el método de los mínimos cuadrados.

RESULTADOS

Frecuencia dominante

La figura 2 muestra las señales registradas en uno de los casos con los 2 electrodos unipolares separados 10 mm en el eje horizontal, así como el registro bipolar correspondiente. La componente principal de los registros unipolares presenta cierto desfase entre ambos electrodos y el registro bipolar sigue presentando dicha componente algo atenuada, aunque en el espectro de frecuencias FrD es similar a la obtenida con los registros unipolares. La figura 3 muestra los trazados de otro experimento obtenidos con 2 electrodos situados a 1 mm en el eje horizontal. En los registros unipola-

res, las oscilaciones más importantes de la señal están aproximadamente en fase y por este motivo se cancelan en el bipolar y dan lugar a la aparición de ondas rápidas y con una FrD diferente a la de los unipolares.

Al analizar la relación entre la FrD obtenida con ambos tipos de registros (bipolares y unipolares), las rectas de regresión correspondientes a cada una de las separaciones interelectrodos en las distintas direcciones muestran en todos los casos coeficientes de regresión significativos (tabla 1 y fig. 4). Estos valores varían entre 0,96, y 0,46 y aunque en todos los casos son significativos, en las gráficas se observan algunos valores discrepantes que disminuyen la magnitud de los coeficientes y podrían estar relacionados con menores grados de coherencia espectral entre los dos tipos de registro.

Al estudiar las diferencias entre los valores medios de FrD obtenidos con los dos tipos de registro (tabla 2), solamente se han observado diferencias significativas al comparar, en una de las diagonales, la modalidad bipolar (separación, 7,1 mm) con una de las unipolares. En el resto de las direcciones los valores de FrD han sido similares para ambas modalidades de registro con las distintas separaciones. Al efectuar el análisis general de todos los datos para determinar las influencias del factor separación y del factor dirección no se han observado diferencias significativas.

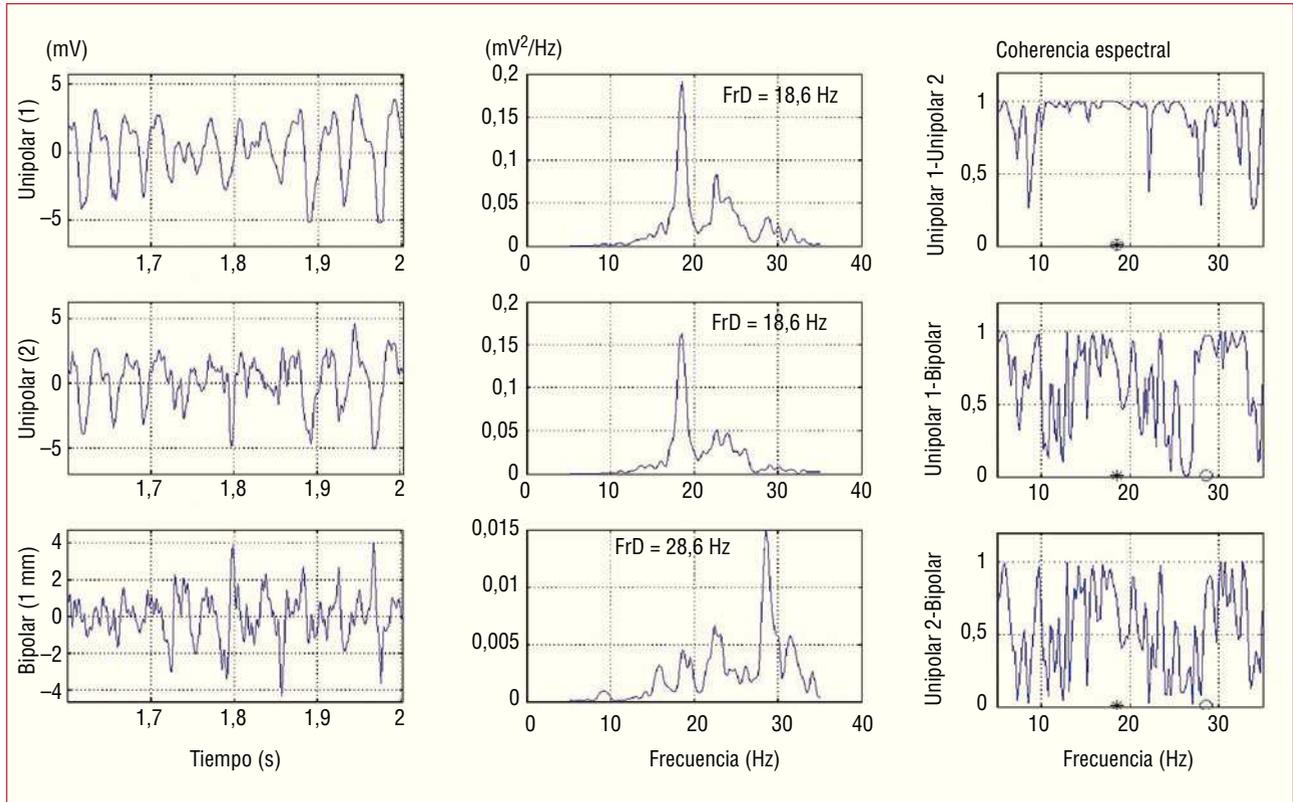


Fig. 3. Espectros de frecuencias (centro) de las señales de la fibrilación ventricular (izquierda) registradas en uno de los experimentos con los electrodos unipolares y con el bipolar (separación, 1 mm; dirección horizontal). Se indica la frecuencia dominante (FrD), que en este caso es mayor en el registro bipolar. A la derecha se muestra la función de coherencia, con valores altos al relacionar los registros unipolares (Unip.1-Unip.2) y con valores más bajos al relacionar cada uno de los unipolares con el bipolar.

TABLA 1. Rectas de regresión obtenidas al relacionar la frecuencia dominante determinada con los registros bipolares y con los unipolares

	Regresión lineal	EE	r	p
H 1 mm	$FrD_{BIP} = 1,01 FrD_{UNI} + 0,94$	3,43	0,66	0,0001
H 5 mm	$FrD_{BIP} = 0,73 FrD_{UNI} + 4,4$	2,97	0,68	0,0001
H 10 mm	$FrD_{BIP} = 0,36 FrD_{UNI} + 9,94$	2,18	0,46	0,0110
V 1 mm	$FrD_{BIP} = 0,89 FrD_{UNI} + 1,96$	2,35	0,8	0,0001
V 5 mm	$FrD_{BIP} = 0,78 FrD_{UNI} + 3,45$	1,56	0,86	0,0001
V 10 mm	$FrD_{BIP} = 0,99 FrD_{UNI} + 0,12$	0,89	0,96	0,0001
DA 1,4 mm	$FrD_{BIP} = 1,21 FrD_{UNI} - 2,97$	2,07	0,87	0,0001
DA 7,1 mm	$FrD_{BIP} = 0,53 FrD_{UNI} + 6,99$	1,62	0,78	0,0001
DA 14,1 mm	$FrD_{BIP} = 0,71 FrD_{UNI} + 4,55$	1,22	0,85	0,0001
DB 1,4 mm	$FrD_{BIP} = 1,12 FrD_{UNI} - 1,54$	2,52	0,8	0,0001
DB 7,1 mm	$FrD_{BIP} = 0,87 FrD_{UNI} + 1,12$	2,4	0,72	0,0001
DB 14,1 mm	$FrD_{BIP} = 0,3 FrD_{UNI} + 10,64$	1,58	0,48	0,0080

DA: diagonal A; DB: diagonal B; EE: error estándar de la estimación; FrD_{BIP} : frecuencia dominante obtenida con los electrodos bipolares; FrD_{UNI} : frecuencia dominante obtenida con los electrodos unipolares; H: horizontal; r: coeficiente de regresión; V: vertical.

Valores de la frecuencia dominante expresados en Hz.

Frecuencia media

La figura 5 muestra los espectros obtenidos en uno de los experimentos con los registros unipolar y bipo-

lar (separación, 5 mm). Aunque en ambos casos los valores de FrD son muy similares, los de FrM difieren entre sí. En el espectrograma del registro bipolar, este parámetro es mayor debido a que hay más componentes frecuenciales en la zona de frecuencias altas del espectro.

La tabla 3 muestra las rectas de regresión obtenidas al relacionar los valores de FrM obtenidos con los registros bipolares y unipolares. Los coeficientes de regresión para cada separación en cada dirección también son significativos en todos los casos (tabla 3 y fig. 4) y están comprendidos entre 0,96 y 0,80.

En la tabla 4 se indican los valores medios \pm DE. En este caso se observan diferencias significativas entre los valores obtenidos con los registros unipolares y bipolares en el eje horizontal (separación, 10 mm), en el vertical (separaciones de 1, 5 y 10 mm), en la diagonal A (separación, 7,1 mm) y en la diagonal B (separaciones de 1,4 y 7,1 mm). Al considerar conjuntamente las variables «separación» y «tipo de registros» (bipolar o unipolar) también hay diferencias tanto en la dirección horizontal ($p < 0,01$) como en ambas diagonales (A, $p < 0,05$; B, $p < 0,001$). Al efectuar el análisis general para determinar las influencias del factor separación y el factor dirección, el primero ha influido significativamente, mientras que el segundo no.

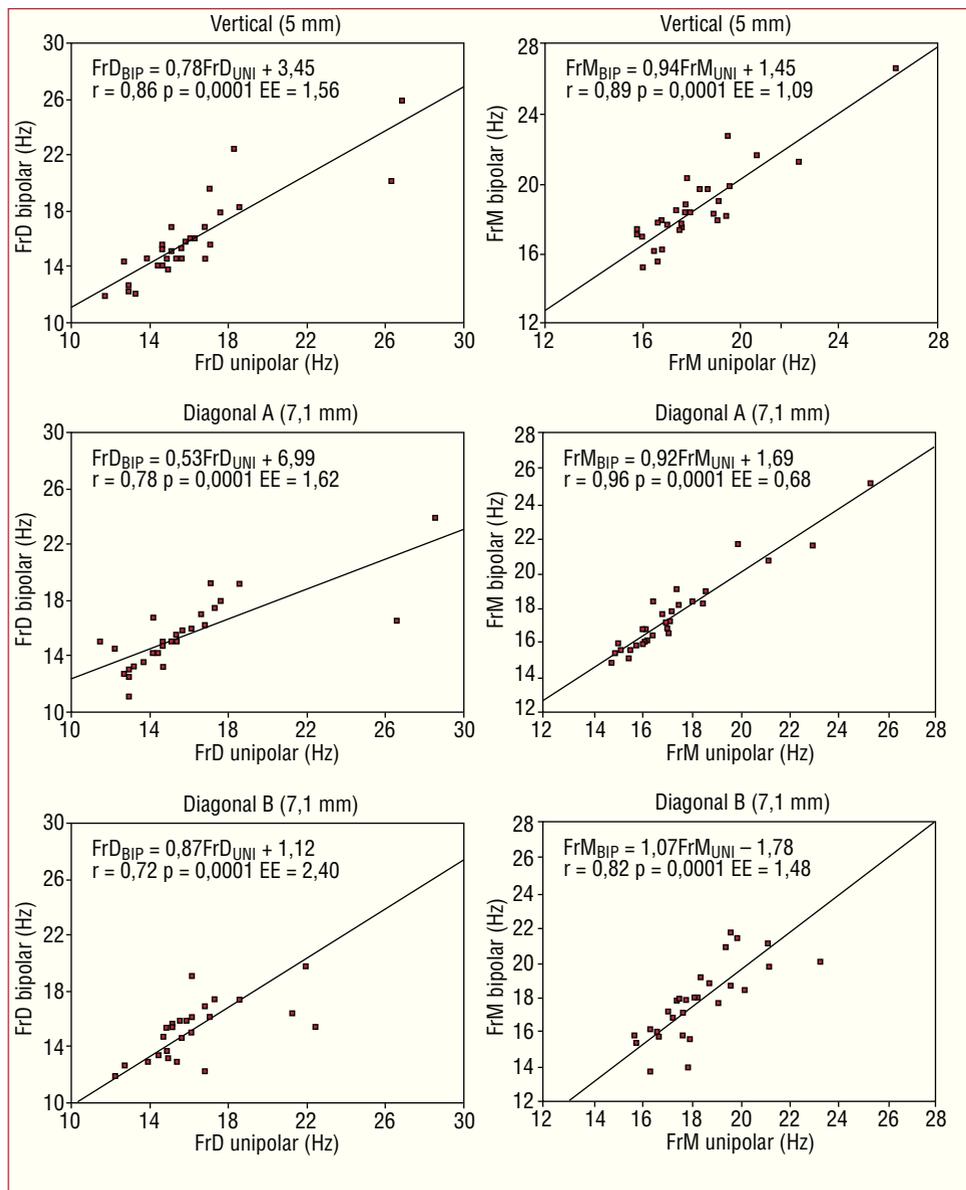


Fig. 4. Rectas de regresión obtenidas al relacionar la frecuencia dominante (izquierda) o la frecuencia media (derecha) del registro bipolar con la de uno de los electrodos unipolares (direcciones vertical y diagonales A y B). EE: error estándar de la estimación; FrD_{BIP} : frecuencia dominante, registro bipolar; FrD_{UNI} : frecuencia dominante, registro unipolar; FrM_{BIP} : frecuencia media, registro bipolar; FrM_{UNI} : frecuencia dominante, registro unipolar; r: coeficiente de regresión.

TABLA 2. Valores de la frecuencia dominante (media \pm 1 DE) obtenidos con los registros unipolares y bipolares para las distintas separaciones entre los electrodos en las direcciones horizontal, vertical y diagonales

	U1	Electrodos U2	Bipolar	U1-U2	p U1-Bipolar	U2-Bipolar
H 1 mm	15,5 \pm 2,9	15,8 \pm 2,8	16,6 \pm 4,5	NS	NS	NS
H 5 mm	15,7 \pm 3,7	16,1 \pm 3	15,9 \pm 4	NS	NS	NS
H 10 mm	15,2 \pm 3,2	16,3 \pm 3,1	15,4 \pm 2,4	NS	NS	NS
V 1 mm	16 \pm 3,5	15,5 \pm 3	16,2 \pm 3,9	NS	NS	NS
V 5 mm	16 \pm 3,4	15,5 \pm 3,1	15,9 \pm 3	NS	NS	NS
V 10 mm	16,2 \pm 3,1	15,4 \pm 2,8	16,1 \pm 3,2	NS	NS	NS
DA 1,4 mm	15,5 \pm 2,9	15,8 \pm 2,8	15,8 \pm 4,1	NS	NS	NS
DA 7,1 mm	15,6 \pm 3,8	15,9 \pm 2,4	15,3 \pm 2,5	NS	NS	NS
DA 14,1 mm	15,9 \pm 2,7	16,3 \pm 2,9	15,8 \pm 2,2	NS	NS	NS
DB 1,4 mm	15,5 \pm 3	15,9 \pm 2,8	15,9 \pm 4,1	0,03	NS	NS
DB 7,1 mm	16,3 \pm 2,8	15,8 \pm 4	15,4 \pm 3,4	NS	0,04	NS
DB 14,1 mm	16,4 \pm 2,8	15,1 \pm 2,8	15,6 \pm 1,8	NS	NS	NS

DA: diagonal A; DB: diagonal B; H: horizontal; NS: diferencias no significativas; U1: electrodo unipolar 1; U2: electrodo unipolar 2; V: vertical. Valores de la frecuencia dominante expresados en Hz.

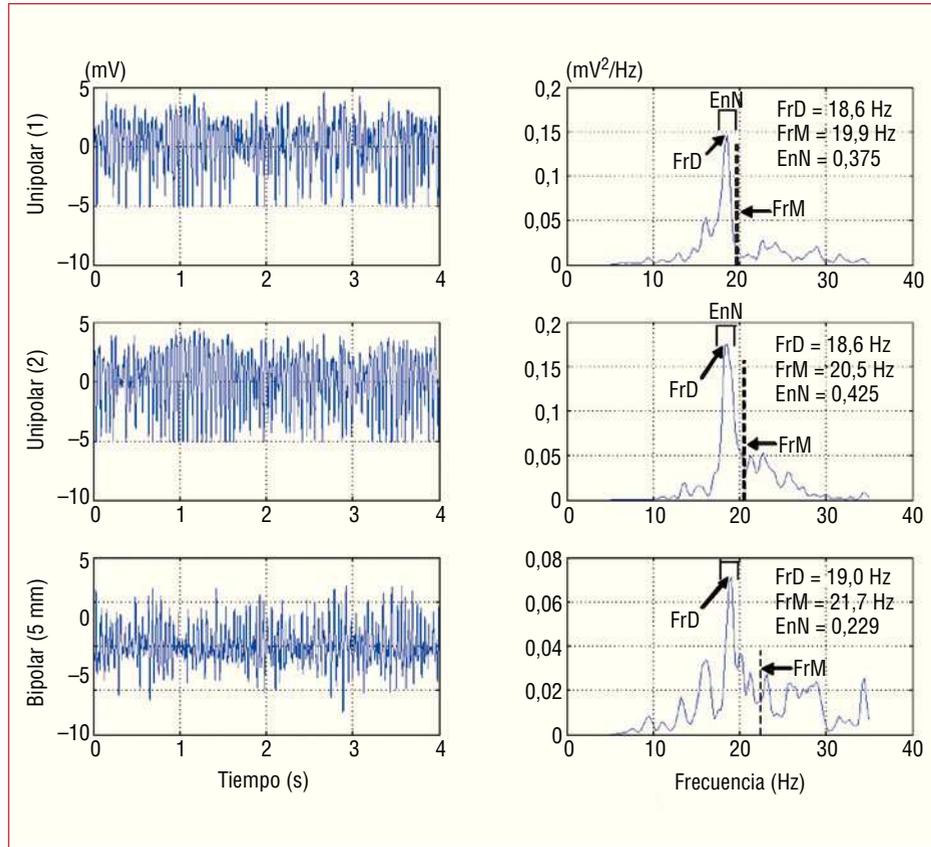


Fig. 5. Espectros de frecuencias de los registros unipolares y bipolar (separación, 5 mm; dirección vertical) de uno de los experimentos en los que se observa la mayor dispersión del espectro del registro bipolar, que origina valores mayores de la frecuencia media (FrM) y valores menores de la energía normalizada (EnN) en la banda de frecuencias $FrD \pm 1$ Hz. La frecuencia dominante (FrD) es muy similar en los 3 registros.

Energía normalizada en la banda $FrD \pm 1$ Hz

La figura 5 muestra los componentes frecuenciales comprendidos alrededor de FrD. En el bipolar, el porcentaje de la energía en dicha banda de frecuencias con respecto a la energía total del espectro es menor. Esta disminución de EnN se debe a la mayor dispersión de los componentes del espectro, que incluye más componentes de frecuencias altas, y por lo tanto quedan menos agrupados en torno a FrD.

La tabla 5 muestra los valores de EnN en las distintas modalidades de registro. Estos valores han sido menores en los registros bipolares tanto en el eje horizontal (separación de 1 y 5 mm) como en el vertical (separación de 1, 5 y 10 mm), en la diagonal A (separación de 1,4 mm) y en la diagonal B (separación de 1,4, 7,1 y 14,1 mm). Al considerar la separación y el tipo de registros, ambas variables conjuntamente muestran diferencias significativas en la dirección vertical ($p < 0,05$) y en una de las diagonales (B; $p < 0,0001$). Al efectuar el análisis general de todos los datos, el factor separación ha influido significativamente, mientras que el factor dirección, no.

Coherencia espectral

Tras obtener el espectro cruzado entre los registros, el análisis de la coherencia entre los unipolares entre sí y

TABLA 3. Rectas de regresión obtenidas al relacionar la frecuencia media determinada con los registros bipolares y con los unipolares

	Regresión lineal	EE	r	p
H 1 mm	$FrM_{BIP} = 1,11 FrM_{UNI} - 1,41$	1,49	0,87	0,0001
H 5 mm	$FrM_{BIP} = 0,98 FrM_{UNI} + 0,59$	0,99	0,93	0,0001
H 10 mm	$FrM_{BIP} = 0,87 FrM_{UNI} + 2,76$	0,93	0,88	0,0001
V 1 mm	$FrM_{BIP} = 0,85 FrM_{UNI} + 3,52$	1,34	0,83	0,0001
V 5 mm	$FrM_{BIP} = 0,94 FrM_{UNI} + 1,45$	1,09	0,89	0,0001
V 10 mm	$FrM_{BIP} = 0,98 FrM_{UNI} + 0,34$	0,85	0,92	0,0001
DA 1,4 mm	$FrM_{BIP} = 1,03 FrM_{UNI} + 0,06$	1,07	0,91	0,0001
DA 7,1 mm	$FrM_{BIP} = 0,92 FrM_{UNI} + 1,69$	0,68	0,96	0,0001
DA 14,1 mm	$FrM_{BIP} = 0,8 FrM_{UNI} + 3,3$	1,01	0,83	0,0001
DB 1,4 mm	$FrM_{BIP} = 1,01 FrM_{UNI} + 0,74$	1,44	0,85	0,0001
DB 7,1 mm	$FrM_{BIP} = 1,07 FrM_{UNI} - 1,78$	1,48	0,82	0,0001
DB 14,1 mm	$FrM_{BIP} = 0,83 FrM_{UNI} + 2,92$	1,12	0,8	0,0001

DA: diagonal A; DB: diagonal B; EE: error estándar de la estimación; FrM_{BIP} : frecuencia dominante obtenida con los electrodos bipolares; FrM_{UNI} : frecuencia dominante obtenida con los electrodos unipolares; H: horizontal; r: coeficiente de regresión; V: vertical. Valores de la frecuencia media expresados en Hz.

entre cada unipolar y el bipolar correspondiente (fig. 3) ha mostrado los resultados de la tabla 6. Los valores medios de la coherencia entre los unipolares decrecen significativamente al aumentar la separación entre los electrodos, mientras que ocurre lo contrario en la coherencia de los registros unipolares con respecto a los bi-

TABLA 4. Valores de la frecuencia media obtenidos con los registros unipolares y bipolares para las distintas separaciones entre los electrodos en las direcciones horizontal, vertical y diagonales derecha e izquierda

	U1	Electrodo U2	Bipolar	U1-U2	p U1-Bipolar	U2-Bipolar
H 1 mm	18,1 ± 2,3	18,2 ± 2	18,6 ± 3	NS	NS	NS
H 5 mm	17,5 ± 2,5	17,8 ± 1,9	17,8 ± 2,7	NS	NS	NS
H 10 mm	17,1 ± 2	18,4 ± 2,1	17,5 ± 2	0,002	0,014	0,006
V 1 mm	18,3 ± 2,4	18,1 ± 2,3	19 ± 2,4	0,017	0,009	0,0001
V 5 mm	18,2 ± 2,2	17,8 ± 1,9	18,6 ± 2,3	NS	0,039	0,0001
V 10 mm	17,4 ± 2	17,1 ± 2	17,5 ± 2,2	NS	NS	0,044
DA 1,4 mm	18,1 ± 2,3	18,3 ± 1,7	18,5 ± 2,6	NS	NS	NS
DA 7,1 mm	17,3 ± 2,4	17,7 ± 1,7	17,6 ± 2,3	NS	0,023	NS
DA 14,1 mm	17,4 ± 1,8	17 ± 2	17,2 ± 1,8	NS	NS	NS
DB 1,4 mm	18,1 ± 2,3	18,4 ± 2,2	19 ± 2,7	0,008	0,002	NS
DB 7,1 mm	18,5 ± 2	17,2 ± 2,5	18 ± 2,6	0,0004	NS	0,0001
DB 14,1 mm	17,5 ± 1,8	17 ± 2	17,4 ± 1,8	NS	NS	NS

DA: diagonal A; DB: diagonal B; H: horizontal; NS: diferencias no significativas; U1: electrodo unipolar 1; U2: electrodo unipolar 2; V: vertical. Valores de la frecuencia media expresados en Hz.

TABLA 5. Valores normalizados de la energía espectral contenida alrededor de la frecuencia dominante (FrD ± 1 Hz) obtenidos con los registros unipolares y bipolares para las distintas separaciones entre los electrodos en las direcciones horizontal, vertical y diagonales derecha e izquierda

	U1	Electrodos U2	Bipolar	U1-U2	p U1-Bipolar	U2-Bipolar
H 1 mm	0,35 ± 0,11	0,36 ± 0,12	0,29 ± 0,1	0,040	0,020	0,007
H 5 mm	0,34 ± 0,12	0,39 ± 0,12	0,33 ± 0,11	0,032	NS	0,012
H 10 mm	0,35 ± 0,14	0,38 ± 0,09	0,36 ± 0,11	NS	NS	NS
V 1 mm	0,37 ± 0,12	0,35 ± 0,11	0,29 ± 0,08	NS	0,001	0,013
V 5 mm	0,38 ± 0,14	0,33 ± 0,1	0,31 ± 0,08	NS	0,002	NS
V 10 mm	0,39 ± 0,14	0,33 ± 0,09	0,35 ± 0,11	0,027	0,020	NS
DA 1,4 mm	0,35 ± 0,11	0,36 ± 0,11	0,31 ± 0,09	NS	NS	0,030
DA 7,1 mm	0,37 ± 0,11	0,36 ± 0,09	0,35 ± 0,11	NS	NS	NS
DA 14,1 mm	0,36 ± 0,12	0,39 ± 0,11	0,38 ± 0,08	NS	NS	NS
DB 1,4 mm	0,35 ± 0,11	0,36 ± 0,12	0,27 ± 0,08	NS	0,004	0,003
DB 7,1 mm	0,38 ± 0,13	0,33 ± 0,11	0,3 ± 0,09	NS	0,004	NS
DB 14,1 mm	0,42 ± 0,14	0,32 ± 0,1	0,37 ± 0,11	0,001	0,012	0,044

DA: diagonal A; DB: diagonal B; H: horizontal; NS: diferencias no significativas; U1: electrodo unipolar 1; U2: electrodo unipolar 2; V: vertical. Valores de la energía espectral expresados en unidades normalizadas con respecto a la energía total del espectro de frecuencias.

TABLA 6. Valores medios (± 1 DE) de la coherencia espectral entre los registros unipolares o entre cada uno de los unipolares y el bipolar correspondiente para las separaciones entre electrodos mínima, intermedia y máxima

Separación	U1-U2	U1-Bipolar	U2-Bipolar
Mínima	0,60 ± 0,07	0,59 ± 0,07	0,56 ± 0,05
Intermedia	0,52 ± 0,03 ^a	0,66 ± 0,08 ^a	0,64 ± 0,08 ^a
Máxima	0,51 ± 0,02 ^a	0,71 ± 0,12 ^{a,b}	0,68 ± 0,13 ^{a,b}

U1: electrodo unipolar 1; U2: electrodo unipolar 2.

^aDiferencias significativas respecto a la separación mínima.

^bDiferencias significativas respecto a la separación intermedia.

polares, donde los mayores valores se obtienen al considerar los registros con mayor separación. Las correlaciones entre la coherencia espectral de los unipolares

entre sí y la de los unipolares con respecto al bipolar correspondiente son significativas y de signo negativo. Las rectas de regresión, obtenidas al considerar como variable dependiente la coherencia espectral de cada unipolar (U1 o U2) con respecto al bipolar (Bip) correspondiente y como variable independiente la coherencia de los unipolares entre sí, son las siguientes:

Coherencia (U1-Bip) = -0,516 Coherencia (U1-U2) + 0,936; (r = 0,29; error estándar de la estimación [EE] = 0,102; n = 348; p = 0,0001).

Coherencia (U2-Bip) = -0,470 Coherencia (U1-U2) + 0,886; (r = 0,27; EE = 0,104; n = 348; p = 0,0001).

Es decir, la coherencia entre cada uno de los unipolares y el bipolar correspondiente se relaciona de manera inversa con la de los unipolares.

DISCUSIÓN

El principal hallazgo del presente trabajo es que la utilización de registros bipolares o unipolares introduce diferencias en la información obtenida con técnicas espectrales durante la FV. Las diferencias se observan fundamentalmente al considerar FrM y la distribución de frecuencias del espectro y son muy pequeñas al considerar FrD.

Análisis de las señales de la FV

En el dominio del tiempo, los parámetros utilizados al analizar los procesos fibrilatorios tanto auriculares como ventriculares abarcan desde los relacionados con la duración de los electrogramas y los ciclos determinados por ellos hasta los relacionados con aspectos morfológicos de las señales. Su utilización permite caracterizar diversos aspectos de estas arritmias, entre ellos los ciclos de activación local, los patrones espaciales de activación miocárdica y su relación con la morfología de los registros³¹⁻³³. La identificación de las líneas de bloqueo, la cuantificación de la complejidad de los patrones de activación y de las modificaciones inducidas por acciones terapéuticas, la propia interpretación de los mapas de activación y la identificación o la exclusión de zonas de interés para la aplicación de procedimientos de ablación se basan en este tipo de análisis o se puede facilitarlas con él.

En el dominio de la frecuencia, el análisis espectral de la FV proporciona diversos parámetros. Entre ellos se encuentra la FrD, que está directamente relacionada con la inversa de los ciclos medios de activación durante la arritmia^{4,10-12}, ya que los electrogramas originados por las activaciones locales del miocardio corresponden a la principal oscilación de las señales registradas. La frecuencia media es la que divide el espectro en dos zonas de igual energía y depende de la distribución de frecuencias. Por este motivo, la FrM es más sensible a la presencia de los diversos componentes que, junto con la frecuencia dominante, conforman el espectro de la señal. Las modalidades de registro (unipolar o bipolar) determinan las características de las señales obtenidas durante los procesos fibrilatorios, que a su vez introducen modificaciones en los componentes espectrales. Cuando se utilizan registros unipolares, los parámetros espectrales proporcionan información sobre la activación en cada electrodo, aunque pueden incorporar componentes originados por señales procedentes de zonas alejadas. En el caso de los registros bipolares éstos indican la diferencia entre ambos electrodos, y si las señales están en fase, se cancelan, y por este motivo los componentes del espectro pueden variar en función de las características de los frentes de activación que alcanzan sucesivamente a uno u otro electrodo.

En el presente trabajo se han observado diferencias significativas en los parámetros más directamente relacionados con la distribución de frecuencias, es decir, FrM y EnN, mientras que las diferencias al considerar la FrD han sido mucho menores, probablemente en relación con las características cambiantes de la activación miocárdica durante la FV, que condiciona la presencia de desfases variables entre las activaciones de los electrodos que configuran el registro bipolar. Éstos dependen de la separación entre los electrodos, pero también de la dirección de los frentes de activación. Si la dirección fuera constante, los desfases influirían mucho en la coherencia espectral; sin embargo, en la FV la dirección de la activación es variable y sus modificaciones durante los lapsos registrados probablemente reducen su importancia. Otro factor que podría estar implicado es la distinta procedencia de los frentes de activación que llegan a cada uno de los electrodos que constituyen el electrodo bipolar, que determinaría tanto la dirección como la frecuencia de activación miocárdica. Estas diferencias son menos probables cuando las separaciones son menores, y este hecho podría estar relacionado con la mayor coherencia entre los registros unipolares cuando las separaciones son mínimas. El hecho de que con estas separaciones se haya obtenido los menores valores de coherencia de las señales unipolares con respecto a las bipolares disminuye la importancia de las posibles diferencias en la frecuencia de activación miocárdica. En el presente trabajo se ha observado que la distancia entre los electrodos determina el grado de coherencia entre los registros unipolares y entre los unipolares y el bipolar correspondiente, de tal modo que cuanto más próximos están los unipolares mayor es la coherencia entre ellos, pero es menor con respecto a los bipolares. A su vez, la coherencia entre cada uno de los unipolares y el bipolar correspondiente se relaciona de manera inversa con la de los unipolares entre sí.

La comparación entre los valores de FrD no ha mostrado diferencias importantes en función del tipo de registro, mientras que las comparaciones de los valores de FrM sí que han revelado diferencias significativas. La FrM, al igual que EnN, está influida por el conjunto de los componentes del espectro y sus variaciones serían compatibles con las diferencias encontradas en la coherencia espectral. Ésta ha sido diferente en función de las comparaciones efectuadas (unipolares entre sí o unipolares respecto a los bipolares) y en función de la separación entre los electrodos.

Desde un punto de vista práctico, la FrD es el parámetro espectral que más se ha utilizado para caracterizar la activación miocárdica durante los procesos fibrilatorios, tanto en la clínica como en los estudios experimentales, y hay que destacar que en el presente

trabajo no se han encontrado diferencias importantes en función del tipo de registro utilizado.

Implicaciones clínicas

La utilización de métodos espectrales para el análisis de la fibrilación, tanto auricular como ventricular, no se limita a los estudios experimentales. Su aplicación en la clínica se relaciona fundamentalmente con su identificación²⁰⁻²², así como la de los lugares de interés sobre los que se podría actuar terapéuticamente^{13,14} y también, al analizar las señales externas, para evaluar el estado del paciente tras una parada cardiorrespiratoria por FV y predecir el éxito de las maniobras encaminadas a la desfibrilación²³⁻²⁶. Tanto en los algoritmos de identificación basados en registros endocavitarios como en la caracterización de los lugares de interés durante los estudios electrofisiológicos, el análisis implica la comparación de parámetros obtenidos en distintos momentos o en distintos lugares del miocardio, y para ello es importante que los criterios de registro y análisis sean uniformes y que se excluya los factores que puedan introducir variaciones espurias. Los resultados del presente trabajo indican que al efectuar el análisis espectral es importante considerar el tipo de registro utilizado (bipolar o unipolar), ya que éste introduce variaciones, especialmente si se considera los parámetros más relacionados con la distribución de frecuencias del espectro, tal como sucede con la FrM.

Limitaciones

En este trabajo se ha utilizado un modelo experimental y electrodos epicárdicos. Esto ha permitido controlar adecuadamente la posición de los electrodos y la distancia entre los 2 componentes de los registros bipolares y demostrar la existencia de diferencias en función de la modalidad de registro. La extrapolación de los resultados obtenidos a la clínica ha de tener en cuenta las características del modelo y de la metodología utilizada y requiere la realización de estudios específicos.

CONCLUSIONES

El tipo de registro utilizado (unipolar o bipolar) introduce variaciones significativas en la información obtenida mediante técnicas espectrales durante la FV. Estas diferencias se observan fundamentalmente en la FrM y en la distribución de frecuencias del espectro, pero son muy pequeñas al considerar la FrD.

BIBLIOGRAFÍA

1. Carlisle RJF, Allen JD, Kernohan G, Leahey W, Adgey AA. Pharmacological analysis of established ventricular fibrillation. *Br J Pharmacol.* 1990;100:530-4.

2. Stewart AJ, Allen JD, Devine AB, Adgey AA. Effects of blockade of fast and slow inward current channels on ventricular fibrillation in the pig heart. *Heart.* 1996;76:513-9.
3. Chorro FJ, Sánchez-Muñoz JJ, Sanchis J, Cortina J, Bataller M, Guerrero J, et al. Modifications in the evolution of the dominant frequency in ventricular fibrillation induced by amiodarone, diltiazem, and flecainide. *J Electrocardiol.* 1996;29:319-26.
4. Chorro FJ, Guerrero J, Cánoves J, Martínez-Sober M, Mainar L, Sanchis J, et al. Quantification of the modifications in the dominant frequency of ventricular fibrillation under conditions of ischemia and reperfusion: an experimental study. *Pacing Clin Electrophysiol.* 1998;21:1716-1723.
5. Chen J, Mandapati R, Berenfeld O, Skanes AC, Jalife J. High-frequency periodic sources underlie ventricular fibrillation in the isolated rabbit heart. *Circ Res.* 2000;86:86-93.
6. Zaitsev AV, Berenfeld O, Mironov SF, Jalife J, Pertsov AM. Distribution of excitation frequencies on the epicardial and endocardial surfaces of fibrillating ventricular wall of the sheep heart. *Circ Res.* 2000;86:408-17.
7. Valderrábano M, Yang J, Omichi C, Kil J, Lamp ST, Qu Z, et al. Frequency analysis of ventricular fibrillation in swine ventricles. *Circ Res.* 2002;90:213-22.
8. Chorro FJ, Millet J, Ferrero A, Cebrián A, Cánoves J, Martínez A, et al. Efecto del estiramiento miocárdico sobre las frecuencias de activación determinadas mediante análisis espectral durante la fibrilación ventricular. *Rev Esp Cardiol.* 2002;55:1143-50.
9. Chorro FJ, Guerrero J, Trapero I, Such-Miquel L, Mainar L, Cánoves J, et al. Análisis tiempo-frecuencia de la fibrilación ventricular. Estudio experimental. *Rev Esp Cardiol.* 2006;59:869-78.
10. Chorro FJ, Cánoves J, Guerrero J, Mainar L, Sanchis J, Such L, et al. Alteration of ventricular fibrillation by flecainide, verapamil and sotalol. An experimental study. *Circulation.* 2000;101:1606-15.
11. Chorro FJ, Guerrero J, Ferrero A, Tormos A, Mainar L, Millet J, et al. Effects of acute reduction of temperature on ventricular fibrillation activation patterns. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* 2002;283:H2331-40.
12. Chorro FJ, Trapero I, Guerrero J, Such LM, Cánoves J, Mainar L, et al. Modification of ventricular fibrillation activation patterns induced by local stretching. *J Cardiovasc Electrophysiol.* 2005;16:1087-96.
13. Ryu K, Shroff SC, Sahadevan J, Martovitz NL, Khrestian CM, Stambler BS. Mapping of atrial activation during sustained atrial fibrillation in dogs with rapid ventricular pacing induced heart failure: Evidence for a role of driver regions. *J Cardiovasc Electrophysiol.* 2005;16:1348-58.
14. Lin YJ, Tai CT, Kao T, Tso HW, Higa S, Tsao HM, et al. Frequency analysis in different types of paroxysmal atrial fibrillation. *J Am Coll Cardiol.* 2006;47:1408-9.
15. Eggenreich U, Fleischmann PH, Stark G, Wach P. Effects of propafenone on the median frequency of ventricular fibrillation in Langendorff perfused guinea-pig hearts. *Cardiovasc Res.* 1996;31:926-31.
16. Baykal A, Ranjan R, Thakor NV. Estimation of the ventricular fibrillation duration by autoregressive modeling. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1997;44:349-56.
17. Mandapati R, Asano Y, Baxter WT, Gray R, Davidenko J, Jalife J. Quantification of effects of global ischemia on dynamics of ventricular fibrillation in isolated rabbit heart. *Circulation.* 1998;98:1688-96.
18. Zaitsev AV, Guha PK, Sarmast F, Kolli A, Berenfeld O, Pertsov AM, et al. Wavebreak formation during ventricular fibrillation in the isolated, regionally ischemic pig heart. *Circ Res.* 2003;92:546-53.
19. Chorro FJ, Cánoves J, Guerrero J, Mainar L, Sanchis J, Soria E, et al. Opposite effects of myocardial stretch and verapamil on the complexity of the ventricular fibrillatory pattern: an experimental study. *Pacing Clin Electrophysiol.* 2000;23:1594-603.
20. Jekova I. Comparison of five algorithms for the detection of ventricular fibrillation from the surface ECG. *Physiol Meas.* 2000;21:429-39.

21. Amann A, Tratnig R, Unterkofler K. Reliability of old and new ventricular fibrillation detection algorithms for automated external defibrillators. *Biome Eng Online*. 2005;4:60.
22. Khadra L, Al-Fahoum AS, Binajaj S. A quantitative analysis approach for cardiac arrhythmia classification using higher order spectral techniques. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2005;52:1840-5.
23. Brown CG, Dzwonczyk R. Signal analysis of the human electrocardiogram during ventricular fibrillation: frequency and amplitude parameters as predictors of successful countershock. *Ann Emerg Med*. 1966;27:184-8.
24. Strohmenger HU, Eftestol T, Sunde K, Wenzel V, Mair M, Ulmer H, et al. The predictive value of ventricular fibrillation electrocardiogram signal frequency and amplitude variables in patients with out-of-hospital cardiac arrest. *Anesth Analg*. 2001;93:1428-33.
25. Eftestol T, Sunde K, Aase SO, Husoy JH, Steen PA. Probability of successful defibrillation as a monitor during CPR in out-of-hospital cardiac arrested patients. *Resuscitation*. 2001;48:245-54.
26. Sherman LD. The frequency ratio: an improved method to estimate ventricular fibrillation duration based on Fourier analysis of the waveform. *Resuscitation*. 2006;69:479-86.
27. Choi BR, Nho W, Liu T, Salama G. Life span of ventricular fibrillation frequencies. *Circ Res*. 2002;91:339-45.
28. Reed MJ, Clegg GR, Robertson CE. Analysing the ventricular fibrillation waveform. *Resuscitation*. 2003;57:11-20.
29. Taneja T, Goldberger J, Parker MA, Johnson D, Robinson N, Horvath G, et al. Reproducibility of ventricular fibrillation characteristics in patients undergoing implantable cardioverter defibrillator implantation. *J Cardiovasc Electrophysiol*. 1997;8:1209-17.
30. Oppenheim A, Schaffer R. *Digital signal processing*. Engelwood Cliffs: Prentice Hall; 1975.
31. Konings KTS, Kirchhof CJHJ, Smeets JRLM, Wellens HJ, Penn OC, Allessie MA. High-density mapping of electrically induced atrial fibrillation in humans. *Circulation*. 1994;89:1665-80.
32. Chorro FJ, Ferrero A, Canoves J, Mainar L, Porres JC, Navarro A, et al. Significance of the morphological patterns of electrograms recorded during ventricular fibrillation: an experimental study. *Pacing Clin Electrophysiol*. 2003;26:1262-9.
33. Konings KTS, Smeets JLRM, Penn OC, Wellens HJ, Allessie MA. Configuration of unipolar atrial electrograms during electrically induced atrial fibrillation in humans. *Circulation*. 1997;95:1231-41.