

Principales medidas anatómicas de las cavidades cardíacas y grandes vasos por tomografía computarizada cardíaca de doble fuente

Dr. Mario E Nápoles Lizano¹ , Dra. Margarita Puerto Díaz²  y Dr. Rafael A. Ibáñez Azán¹

¹ Departamento de Tomografía Cardíaca y ² Departamento de Docencia e Investigaciones, Hospital Universitario Cardiocentro Ernesto Che Guevara. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Full English text of this article is also available

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Recibido: 19 de noviembre de 2020

Aceptado: 30 de diciembre de 2020

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Abreviaturas

TC: tomografía computarizada

VI: ventrículo izquierdo

VD: ventrículo derecho

RESUMEN

Introducción: Los avances tecnológicos en tomografía computarizada han hecho posible la evaluación de estructuras pequeñas y móviles, como las arterias coronarias y el resto del corazón. La tomografía cardíaca aporta información anatómica y funcional.

Objetivo: Identificar los valores de las principales medidas anatómicas de las cavidades cardíacas y los grandes vasos, y compararlos con los valores de referencia utilizados.

Método: Se realizó un estudio analítico de investigación y desarrollo con un universo de 325 pacientes normotensos, no obesos, sin enfermedad estructural cardiopulmonar o de grandes vasos, arritmia o enfermedad coronaria significativa, de donde se seleccionaron 100 pacientes por muestreo probabilístico aleatorio simple, a quienes se les realizó tomografía computarizada cardíaca de doble fuente en el Cardiocentro Ernesto Che Guevara, Santa Clara, Cuba.

Resultados: Las mediciones ventriculares izquierda y derecha mostraron diferencias con la mayoría de los valores referenciales. Los diámetros de la aorta, aumentaron con la edad, fueron superiores en los hombres y difieren de los valores de referencia con excepción del medido en eje corto de la raíz aórtica en telediástole, y el diámetro en eje corto de la aorta descendente en telesístole. La arteria pulmonar mostró diferencias significativas con relación a los valores de referencia.

Conclusiones: Las mediciones de las cavidades cardíacas y los grandes vasos basados en las técnicas tomográficas constituyen una necesidad en determinados grupos poblacionales para lograr una estandarización adecuada debido a su gran variabilidad en relación a distintas variables. La diferencia significativa con los valores de referencia indica la necesidad de estudios multicéntricos con poblaciones mayores para lograr su homogeneidad.

Palabras clave: Tomografía computarizada multidetector, Angiografía por tomografía computarizada, Arterias coronarias, Cavidades cardíacas, Valores de referencia

Main anatomical sizes of the cardiac chambers and great vessels by dual-source cardiac computed tomography

ABSTRACT

Introduction: Technological advances in computed tomography have made it possible to assess small, mobile structures such as the coronary arteries and the rest of the heart. Cardiac tomography provides anatomical and functional information.

Objectives: To identify the values of the main anatomical sizes of the cardiac chambers and great vessels.

✉ ME Nápoles Lizano
Cardiocentro Ernesto Che Guevara
Calle Cuba N° 610 e/ Barcelona y
Capitán Velasco. Santa Clara, CP
50200. Villa Clara, Cuba.
Correo electrónico:
marioenapoles@gmail.com

Contribución de los autores

MENL y RAIA: Concepción y diseño de la investigación; obtención, análisis e interpretación de los datos, y redacción del manuscrito.

MPD: Concepción y diseño de la investigación, y ayuda en la redacción del manuscrito.

Todos los autores revisaron críticamente el manuscrito y aprobaron el informe final.

bers and great vessels, and compare them with the reference values.

Methods: An analytical research and development study was conducted with a population of 325 normotensive, non-obese patients without cardiopulmonary or great vessel structural disease, arrhythmia or significant coronary artery disease. One hundred patients were selected by simple random probability sampling, who underwent dual-source cardiac computed tomography at the Cardiocentro Ernesto Che Guevara, Santa Clara, Cuba.

Results: Left and right ventricular measurements showed differences when compared with most reference values. Aortic diameters increased with age. They were higher in men and were different from the reference values except for the short-axis diameter of the aortic root in end-diastole and short-axis diameter of the descending aorta in end-systole. The pulmonary artery showed significant differences in relation to the reference values.

Conclusions: Measurements of cardiac chambers and great vessels by tomographic techniques are necessary in certain population groups to achieve adequate standardization due to their great variability in relation to different variables. The significant difference with the reference values indicates the need for multicenter studies with larger populations to achieve homogeneity.

Keywords: Multidetector computed tomography, Computed tomography angiography, Coronary arteries, Heart chambers, Reference values

INTRODUCCIÓN

El 8 de noviembre de 1895 Wilhelm Conrad Roentgen descubrió los rayos X en su laboratorio (Wurzburg, Alemania), este descubrimiento permitió la visualización interna del cuerpo humano y, años después, su utilización en el diagnóstico de enfermedades¹.

La progresión de esta técnica ha sido espectacular, a partir de la cual surgió la tomografía computarizada (TC). La TC secuencial evolucionó a la tecnología helicoidal, que comenzó en la segunda mitad de los ochenta; pues, cuando se creía que esta técnica había entrado en su etapa final debido al surgimiento de otras como la resonancia magnética, Kalender *et al.*² revolucionaron la tomografía con el modelo de adquisición en espiral, con una reducción considerable de la resolución temporal, a la que se añadió paulatinamente la mejoría en la resolución espacial, al pasar de los equipos de una sola fila de detectores al de dos filas, y un poco más tarde a los modelos de 4, 16, 32, 40, 64, 128, 256 y 320 imágenes por rotación^{2,3}. Otro hito tecnológico es el doble tubo, que permite un método de adquisición especial⁴⁻⁷, similar al equipo utilizado en este estudio, que se describe más adelante.

Los grandes avances tecnológicos en TC han hecho posible la evaluación de estructuras pequeñas y móviles, como las arterias coronarias y del resto del corazón. La TC coronaria aporta información anatómica y funcional, y permite el diagnóstico de enfer-

medades congénitas y adquiridas⁸. Actualmente es posible realizar los estudios con baja dosis de radiación y de contraste endovenoso, lo que disminuye las complicaciones y contraindicaciones de este examen.

La evaluación del corazón y de las arterias coronarias con TC se hace posible al sincronizar la obtención de las imágenes con el electrocardiograma del paciente. Esto es lo que diferencia una TC coronaria de la de cualquier otra parte del cuerpo. El corazón, como órgano en constante movimiento y con estructuras de pequeño tamaño, constituye un desafío para la evaluación con imágenes⁸⁻¹⁰.

Las mediciones de las estructuras cardíacas basadas en técnicas tomográficas varían en determinados grupos poblacionales, en dependencia de algunas variables, como la edad, el color de la piel y el sexo, entre otras; por estas razones, el objetivo de esta investigación fue identificar los valores de las principales medidas anatómicas de las cavidades cardíacas y los grandes vasos, y compararlos con los valores de referencia utilizados.

MÉTODO

Se realizó un estudio analítico comparativo, de investigación y desarrollo, en pacientes no obesos, normotensos, sin enfermedad estructural cardiopulmonar o de grandes vasos, arritmia o enfermedad coronaria significativa, procedentes de las pro-

vincias Cienfuegos, Sancti Spíritus, Villa Clara, Ciego de Ávila y Camagüey, a los que se le realizó angiografía coronaria, en el Hospital Provincial Universitario Cardiocentro Ernesto Guevara, desde noviembre de 2016 a enero de 2019.

El universo estuvo constituido por 325 pacientes con las características señaladas, y la muestra quedó constituida por 100 pacientes seleccionados mediante un muestreo probabilístico aleatorio simple.

Tomógrafo

En el Departamento de Tomografía Cardíaca y Vascular del Cardiocentro Ernesto Che Guevara, donde se realizó este estudio, se encuentra instalado un equipo *Somatom Definition* (Siemens, Alemania) equipado con dos tubos de rayos X y sus dos detectores correspondientes, montados en el pórtico giratorio con un desplazamiento angular de 90°. Con respecto a las capacidades de imágenes cardíacas, este sistema de escáner ofrece una alta resolución temporal de 83 ms, en un modo de reconstrucción de segmento único. La resolución temporal es independiente de la frecuencia cardíaca, que es una gran diferencia de los sistemas de TC de una sola fuente, que se basan en técnicas de reconstrucción de múltiples segmentos.

Se utilizan protocolos de adquisición de imágenes de SIEMENS con la inyección de contraste yodado de baja densidad ULTRAVIST 370, mediante una bomba de inyección ULRISCH de última generación y protocolos de disparo ultrarrápidos, con calibración automática del tubo, con lo que se logran dosis mínimas de radiaciones. La adquisición de las imágenes se sincroniza al intervalo R-R del electrocardiograma, que es dependiente de la frecuencia cardíaca del paciente.

Análisis angiográfico

Las mediciones fueron realizadas en reconstrucciones multiplanares en los ejes corto y largo, así como en los planos de dos, tres y cuatro cámaras. Se utilizaron, además, planos cardíacos perpendiculares del tronco de la arteria pulmonar y de la aorta en las vistas axiales. Para la evaluación funcional o dinámica del ventrículo y los grandes vasos se realizó el análisis en las dos etapas del ciclo cardíaco, sístole y diástole, y se utilizaron las reconstrucciones volumétricas para la ubicación anatómica.

En general, el análisis de las características anatómicas del corazón y los grandes vasos, en este estudio, se basó en la interpretación de las imágenes a partir de los planos cardíacos estándares, con la

utilización de la misma nomenclatura que en las demás modalidades de imagen cardíaca no invasiva y las recomendaciones del consenso de expertos en angiografía coronaria por TC¹¹.

Análisis estadístico

Para el procesamiento y análisis de los datos se utilizó el programa estadístico SPSS Versión 15.0 y se realizaron pruebas de inferencia para variables cuantitativas, mediante la aplicación de las pruebas *t de Student* y ANOVA (*ANalysis Of VAriance*). Además, los resultados fueron comparados con los valores hipotéticos utilizados como referentes a nivel internacional mediante el empleo de la prueba *t de Student* para una muestra.

RESULTADOS

En la **figura** se muestra la distribución de los pacientes según edad y sexo, donde predominaron el grupo de edad entre 40 y 60 años, y el sexo femenino, ambos con igual frecuencia (55%).

Los valores de ambos ventrículos encontrados en la población de estudio difieren significativamente de los valores de referencia (**Tabla 1**), con excepción del diámetro septal-lateral del ventrículo derecho.

Los valores medios de la aorta torácica, medidos en eje corto, según el sexo, fueron superiores en el masculino para todas las mediciones (**Tabla 2**), y se encontró diferencia significativa en el diámetro tele-diastólico y el área de la raíz aortica, así como en los diámetros telesistólicos de la aorta ascendente y la

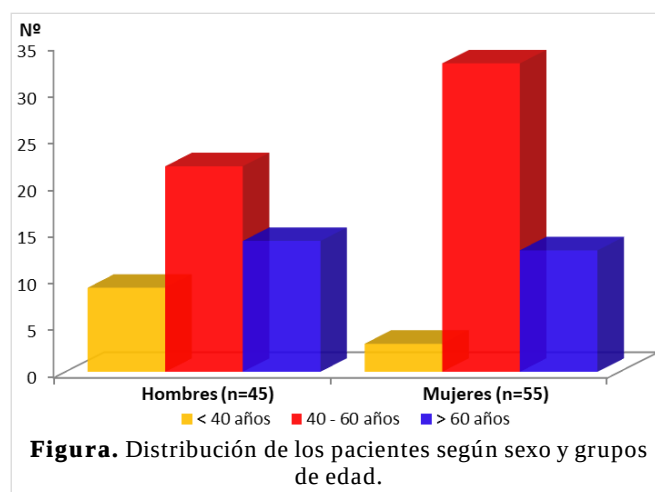


Tabla 1. Valores de los ventrículos izquierdo y derecho, en comparación con los valores de referencia.

Medidas en eje corto (mm)	Media	Intervalo de confianza 95%		Valor de referencia	t	p
Fracción eyección del VI	60,88	58,89	62,87	63,8	-2,909	0,040
Volumen telediastólico del VI	122,49	116,62	128,36	143,6	-7,136	<0,0001
Volumen telesistólico del VI	49,19	45,89	52,49	52,6	-2,052	0,043
Grosor parietal del VI	10,17	9,80	10,53	7,3	15,39	<0,0001
Grosor parietal del VD	3,59	3,37	3,81	2,4	10,54	<0,0001
Diámetro septal-lateral del VI	43,77	42,60	44,94	47,4	-1,37	<0,0001
Diámetro septal-lateral del VD	38,05	36,87	39,23	37	1,76	0,081
Diámetro anteroinferior del VI	53,03	51,64	54,42	57,7	-6,65	<0,0001
Diámetro anteroinferior del VD	50,89	48,36	53,42	72,6	-17	<0,0001
Diámetro apical anular del VI	74,65	72,89	76,41	87,6	-14,56	<0,0001
Diámetro apical anular del VD	67,46	65,80	69,12	77,7	-12,25	<0,0001

VD, ventrículo derecho; VI, ventrículo izquierdo

Tabla 2. Valores medios de aorta según sexo.

Medidas en eje corto (mm)	Masculino	Femenino	Total	t	p
Diámetro TD de raíz Ao	32,51	29,62	30,92	3,93	<0,0001
Área TD de raíz Ao (mm ²)	93,27	75,45	83,47	5,06	<0,0001
Diámetro TD de Ao ascendente	30,49	29,22	29,79	1,53	0,13
Diámetro TS de Ao ascendente	31,84	30,24	30,96	2,07	0,04
Diámetro TD de Ao descendente	23,27	22,13	22,64	1,44	0,15
Diámetro TS de Ao descendente	24,04	21,55	22,67	4,86	<0,0001

Ao, aorta; TD, telediastólico; TS, telesistólico.

Tabla 3. Comparación de valores de la aorta, según sexo, con los valores de referencia.

Medidas en eje corto (mm)	Media	Intervalo de confianza 95%		Valor de referencia	t	p
Femenino						
Diámetro TD de raíz Ao	29,62	28,80	30,44	29	1,51	0,137
Área TD de raíz Ao (mm ²)	75,45	71,89	79,02	69	3,63	0,010
Diámetro TD de Ao ascendente	29,22	28,25	30,18	28	2,53	0,014
Diámetro TS de Ao ascendente	30,24	29,26	31,21	29	2,54	0,014
Diámetro TD de Ao descendente	22,13	20,94	23,31	20	3,59	0,010
Diámetro TS de Ao descendente	21,55	20,86	22,23	22	-1,34	0,187
Masculino						
Diámetro TD de raíz Ao	32,51	31,28	33,74	32	0,87	0,009
Área TD de raíz Ao (mm ²)	93,27	87,15	99,38	85	2,72	<0,0001
Diámetro TD de Ao ascendente	30,49	29,07	31,90	28	3,54	0,001
Diámetro TS de Ao ascendente	31,84	30,59	33,10	30	2,96	0,005
Diámetro TD de Ao descendente	23,27	22,28	24,25	22	2,58	0,013
Diámetro TS de Ao descendente	24,04	23,26	24,83	23	2,69	0,010

Ao, aorta; TD, telediastólico; TS, telesistólico

descendente. Al comparar estas variables entre ambos sexos, todas mostraron diferencias significativas con los valores de referencia, excepto los diámetros telediastólico de la raíz aórtica y telesistólico de la aorta descendente en el sexo femenino (**Tabla 3**).

En la **tabla 4** se muestran los valores medios de los diferentes segmentos aórticos medidos, según los tres grupos de edad, donde se puede apreciar su

incremento a medida que avanza la edad, con diferencias significativas en los diámetros de aorta ascendente ($p=0,009$) y descendente ($p<0,0001$), más evidente respecto al grupo menor de 40 años; sin embargo, al comparar estos resultados con los valores de referencia, en este grupo etario no hubo diferencias significativas, mientras que sí las hubo en el de 40 a 60 años, específicamente en los valores me-

Tabla 4. Valores medios de la aorta según grupos de edad, en comparación con los valores de referencia.

Medidas telediastólicas en eje corto (mm)	Media	Intervalo de confianza 95%		Valor de referencia	t	p
Menores de 40 años						
Diámetro de raíz Ao	30,06	28,30	31,82	31	-1,13	0,273
Área de raíz Ao (mm ²)	76,33	68,15	84,52	78	-0,43	0,673
Diámetro de Ao ascendente*	27,33	25,56	29,11	26	1,58	0,131
Diámetro de Ao descendente**	19,39	18,23	20,55	20	1,11	0,28
40 - 60 años						
Diámetro de raíz Ao	30,53	29,49	31,57	31	-0,91	0,36
Área de raíz Ao (mm ²)	83,89	78,97	88,82	80	1,58	0,12
Diámetro de Ao ascendente*	29,95	28,83	31,06	28	3,48	0,01
Diámetro de Ao descendente**	23,24	22,09	24,38	20	5,65	<0,0001
Mayores de 60 años						
Diámetro de raíz Ao	32,30	30,83	33,76	30	3,22	0,03
Área de raíz Ao (mm ²)	87,37	79,01	95,73	76	2,79	0,01
Diámetro de Ao ascendente*	31,11	29,55	32,67	31	0,146	0,88
Diámetro de Ao descendente**	23,59	22,37	24,81	22	2,68	0,01

Ao, aorta

* $p=0,009$ al comparar entre grupos de edad

** $p<0,0001$ al comparar entre grupos de edad

Tabla 5. Valores medios de la arteria pulmonar y la vena cava superior en comparación con los valores de referencia.

Vasos	Media	Intervalo de con- fianza 95%		Valor de referencia	t	p
Arteria pulmonar						
Diámetro en eje corto	28,09	27,36	28,82	25	8,41	<0,0001
Diámetro anteroposterior	27,90	27,23	28,57	26	5,6	<0,0001
Diámetro lateral	26,44	25,66	27,22	24	6,1	<0,0001
Relación aorta-AP en eje corto	1,13	1,10	1,15	0,9	17,4	<0,0001
Vena cava superior						
Eje menor	15,2	14,72	15,68	17	-7,43	<0,0001
Eje mayor	21,18	20,64	21,72	21	0,6	0,511
Área por planimetría	27,6	26,24	28,96	27	0,87	0,381

AP, arteria pulmonar.

dios de los diámetros de aorta ascendente ($p=0,01$) y descendente ($p<0,0001$). De igual forma, se encontraron diferencias significativas respecto a los valores de referencia en tres de las cuatro variables analizadas, en pacientes mayores de 60 años: diámetro ($p=0,03$) y área ($p=0,01$) de la raíz aórtica y diámetro de la aorta descendente ($p=0,01$).

Todos los valores medios obtenidos de la arteria pulmonar difieren muy significativamente ($p<0,0001$) de los valores de referencia (**Tabla 5**). En el caso de la vena cava superior solo se encontró diferencia significativa en el valor medio de su eje menor ($p<0,0001$).

DISCUSIÓN

El primer escáner de TC fue diseñado, en 1972, por el ingeniero Geoffrey N. Hounsfield⁴ —Premio Nobel de Medicina en 1979— en una compañía inglesa llamada EMI Ltd, junto con Allan C. Cormack, un físico de Ciudad del Cabo que desarrolló la base matemática, basado en las modificadas de Radon, publicadas en 1917 para la reconstrucción de imágenes transversales de mediciones de transmisión¹². Los primeros escáneres de TC, actualmente conocidos como escáneres de tomografía axial computarizada, se limitaron a imágenes craneales, hasta que se produjeron para el cuerpo entero en el año 1975. Pero la velocidad de rotación de estos primeros equipos de TC mecánicos era insuficiente para la imagen de órganos en movimiento; por lo que, a fines de la década de 1970, se desarrolló un sistema de TC muy rápido, sin partes rotativas, dedicado a la obtención de imágenes del corazón, seguido por las técnicas multicorte de fuentes giratorias simultáneamente con la fuente de rayos^{13,14}. Introducida a principios de la década de 1990, la TC helicoidal permitió una rápida cobertura de grandes secciones del cuerpo, lo cual fue particularmente útil para aplicaciones de TC angiográficas y cardíacas, gracias a su resolución temporal y espacial, lo que facilitó la obtención de imágenes de alta calidad de órganos en movimiento y latientes, como el corazón y los grandes vasos^{13,14}.

Al desarrollo en la adquisición de las imágenes le siguió el del software para las reconstrucciones en el departamento de posprocesamiento, donde estas se analizan para llegar a conclusiones diagnósticas. A todo esto se unen los protocolos de inyección y de adquisición con el uso de bajas dosis de radiaciones, sincronizados al electrocardiograma del paciente con reconstrucciones submilimétricas, que faci-

tan la visualización de detalles anatómicos con gran nitidez, sobre todo en el corazón y los vasos del tórax y el mediastino. Como ya se ha planteado, esto se logra por la mejoría en la resolución espacial y temporal, y la adquisición volumétrica del tomógrafo de doble fuente, que tiene una resolución temporal de 83 ms por 64 filas de detectores a 0,625 mm de grosor, y adquiere por cada rotación de 360 grados 40 mm de volumen en el eje Z o longitudinal del cuerpo^{8-10,15-17}.

Lin *et al.*¹⁸ realizaron una investigación parecida a la nuestra con un número y características similares de los pacientes estudiados. De forma general, las medidas y volúmenes de ambos ventrículos difieren levemente de nuestros resultados y, algunas de ellas, presentan diferencias estadísticas significativas. Estos autores establecieron valores específicos, según edad y sexo, del tamaño, función y masa de todas las cámaras cardíacas, en adultos sin enfermedades cardiovasculares, hipertensión u obesidad; y proponen que estos datos pueden utilizarse como referencia para futuros estudios de tomografía computarizada multidetector. Por su parte, Stojanovska *et al.*¹⁹ normalizaron el rango de referencia para el volumen, la función y la masa de ambos ventrículos, según la edad, el sexo y la superficie corporal, y observaron diferencias estadísticamente significativas entre hombres y mujeres tanto en la masa del ventrículo izquierdo, como en el volumen del derecho ($p < 0,0001$). Además, la edad y el sexo se asociaron a diferencias significativas en el volumen diastólico final del ventrículo derecho ($p=0,027$) y la fracción de eyección del izquierdo ($p=0,03$). Resultados similares han sido encontrados por otros autores²⁰⁻²².

Los valores de la aorta torácica fueron significativamente mayores en los pacientes del sexo masculino, lo cual se justifica por la diferencia de superficie corporal. Sin embargo, estos parámetros tuvieron una diferencia menos significativa con el patrón de referencia, probablemente relacionado con la menor variabilidad de los diámetros aórticos de estos segmentos con respecto a la superficie corporal. Al analizar estas mismas variables según los tres grupos de edad, se observó que la variación de los diámetros aórticos de cualquiera de los segmentos estudiados aumenta proporcionalmente con la edad, y se encontró una diferencia significativa en cuanto a los diámetros de la aorta ascendente y la descendente. Estos resultados también coinciden con otro estudio de Lin *et al.*²³.

Los valores para cada parámetro de la arteria

pulmonar y la vena cava superior mostraron diferencias significativas comparándolas con los patrones de referencia, pero son similares a los encontrados por Edwards *et al.*²⁴ y a lo descrito por Sonavane *et al.*²⁵, respectivamente.

CONCLUSIONES

Las mediciones de las cavidades cardíacas y grandes vasos basados en las técnicas tomográficas multicorte de doble fuente es una necesidad en determinados grupos de población para lograr una estandarización adecuada debido a su gran variabilidad en relación a diferentes variables, como el color de la piel (o la raza), edad y sexo, entre otras variables. Sus diferencias significativas con los valores referenciales y dentro del mismo grupo poblacional nos indican que se deben realizar estudios multicéntricos con poblaciones mayores para lograr una adecuada homogeneidad de dichas medidas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Rontgen WC. Über Eine Neue Art Von Strahlen. Sitzungsberichte der physikalisch-medizinischen gesellschaft zu Würzburg. Berlín: Springer-Verlag. 1895.
2. Kalender WA, Seissler W, Klotz E, Vock P. Spiral volumetric CT with single-breath-hold technique, continuous transport, and continuous scanner rotation. *Radiology*. 1990;176(1):181-3. [DOI]
3. Flohr TG, Schaller S, Stierstorfer K, Bruder H, Ohnesorge BM, Schoepf UJ. Multi-detector row CT systems and image-reconstruction techniques. *Radiology*. 2005;235(3):756-73. [DOI]
4. Brooks RA. A quantitative theory of the Hounsfield unit and its application to dual energy scanning. *J Comput Assist Tomogr*. 1977;1(4):487-93. [DOI]
5. McCollough CH, Primak AN, Saba O, Bruder H, Stierstorfer K, Raupach R, *et al.* Dose performance of a 64-channel dual-source CT scanner. *Radiology*. 2007;243(3):775-84. [DOI]
6. Kalender WA, Perman WH, Vetter JR, Klotz E. Evaluation of a prototype dual-energy computed tomographic apparatus. I. Phantom studies. *Med Phys*. 1986;13(3):334-9. [DOI]
7. Johnson TR, Krauss B, Sedlmair M, Grasruck M, Bruder H, Morhard D, *et al.* Material differentiation by dual energy CT: initial experience. *Eur Radiol*. 2007;17(6):1510-7. [DOI]
8. Gerber TC, Carr JJ, Arai AE, Dixon RL, Ferrari VA, Gomes AS, *et al.* Ionizing radiation in cardiac imaging: a science advisory from the American Heart Association Committee on Cardiac Imaging of the Council on Clinical Cardiology and Committee on Cardiovascular Imaging and Intervention of the Council on Cardiovascular Radiology and Intervention. *Circulation*. 2009;119(7):1056-65. [DOI]
9. Choi TY, Malpeso J, Li D, Sourayanezhad S, Budoff MJ. Radiation dose reduction with increasing utilization of prospective gating in 64-multidetector cardiac computed tomography angiography. *J Cardiovasc Comput Tomogr*. 2011; 5(4):264-70. [DOI]
10. Jakobs TF, Becker CR, Ohnesorge B, Flohr T, Suess C, Schoepf UJ, *et al.* Multislice helical CT of the heart with retrospective ECG gating: reduction of radiation exposure by ECG-controlled tube current modulation. *Eur Radiol*. 2002;12(5):1081-6. [DOI]
11. Mark DB, Berman DS, Budoff MJ, Carr JJ, Gerber TC, Hecht HS, *et al.* ACCF/ACR/AHA/NASCI/SAIP/SCAI/SCCT 2010 expert consensus document on coronary computed tomographic angiography: A report of the American College of Cardiology Foundation Task Force on Expert Consensus Documents. *Circulation*. 2010;121(22):2509-43. [DOI]
12. Radon J. Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten (On the determination of functions from their integral values along certain manifolds). *Berichte über die Verhandlungen der Königlich-Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig. Mathematisch-Physische Klasse*. 1917;69:262-7.
13. Wicky S, Rosol M, Hoffmann U, Graziano M, Yucel KE, Brady TJ. Comparative study with a moving heart phantom of the impact of temporal resolution on image quality with two multidetector electrocardiography-gated computed tomography units. *J Comput Assist Tomogr*. 2003;27(3):392-8. [DOI]
14. Nieman K, Rensing BJ, van Geuns RJ, Vos J, Pattynama PM, Krestin GP, *et al.* Non-invasive coronary angiography with multislice spiral computed tomography: impact of heart rate. *Heart*. 2002; 88(5):470-4. [DOI]
15. Bastarrika G, Arraiza M, Arias J, Broncano J, Zudaire B, Pueyo JC, *et al.* Coronariografía mediante tomografía computarizada de doble fuente: cali-

- dad de imagen e intervalo de reconstrucción óptimo. *Radiología*. 2009;51(4):376-84. [DOI]
16. Ropers D, Baum U, Pohle K, Anders K, Ulzheimer S, Ohnesorge B, *et al*. Detection of coronary artery stenoses with thin-slice multi-detector row spiral computed tomography and multiplanar reconstruction. *Circulation*. 2003;107(5):664-6. [DOI]
 17. Nieman K, Cademartiri F, Lemos PA, Raaijmakers R, Pattynama PM, de Feyter PJ. Reliable noninvasive coronary angiography with fast submillimeter multislice spiral computed tomography. *Circulation*. 2002;106(16):2051-4. [DOI]
 18. Lin FY, Devereux RB, Roman MJ, Meng J, Jow VM, Jacobs A, *et al*. Cardiac chamber volumes, function, and mass as determined by 64-multi-detector row computed tomography: mean values among healthy adults free of hypertension and obesity. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2008;1(6):782-6. [DOI]
 19. Stojanovska J, Prasitdumrong H, Patel S, Sundaram B, Gross BH, Yilmaz ZN, *et al*. Reference absolute and indexed values for left and right ventricular volume, function and mass from cardiac computed tomography. *J Med Imaging Radiat Oncol*. 2014;58(5):547-58. [DOI]
 20. Nuffer Z, Baran TM, Krishnamoorthy V, Kaproth-Joslin K, Chaturvedi A. Accuracy of Non-Electrocardiographically Gated Thoracic CT Angiography for Right Atrial and Right Ventricular Enlargement. *Radiol Cardiothorac Imaging* [Internet]. 2019 [citado 17 Nov 2020];1(4):e190008. Disponible en: <https://doi.org/10.1148/ryct.2019190008>
 21. Koo HJ, Lee JG, Ko JY, Lee G, Kang JW, Kim YH, *et al*. Automated Segmentation of Left Ventricular Myocardium on Cardiac Computed Tomography Using Deep Learning. *Korean J Radiol*. 2020;21(6):660-9. Disponible en: <https://doi.org/10.3348/kjr.2019.0378>
 22. Abdelrahman KM, Chen MY, Dey AK, Virmani R, Finn AV, Khamis RY, *et al*. Coronary Computed Tomography Angiography From Clinical Uses to Emerging Technologies: JACC State-of-the-Art Review. *J Am Coll Cardiol*. 2020;76(10):1226-43. [DOI]
 23. Lin FY, Devereux RB, Roman MJ, Meng J, Jow VM, Jacobs A, *et al*. Assessment of the thoracic aorta by multidetector computed tomography: age- and sex-specific reference values in adults without evident cardiovascular disease. *J Cardiovasc Comput Tomogr*. 2008;2(5):298-308. [DOI]
 24. Edwards PD, Bull RK, Coulden R. CT measurement of main pulmonary artery diameter. *Br J Radiol*. 1998;71(850):1018-20. [DOI]
 25. Sonavane SK, Milner DM, Singh SP, Abdel Aal AK, Shahir KS, Chaturvedi A. Comprehensive Imaging Review of the Superior Vena Cava. *Radiographics*. 2015;35(7):1873-92. [DOI]

Main anatomical sizes of the cardiac chambers and great vessels by dual-source cardiac computed tomography

Mario E. Nápoles Lizano¹ , MD; Margarita Puerto Díaz² , MD; and Rafael A. Ibáñez Azán¹, MD

¹ Departamento de Tomografía Cardíaca y ² Departamento de Docencia e Investigaciones, Hospital Universitario Cardiocentro Ernesto Che Guevara. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Este artículo también está disponible en español

ARTICLE INFORMATION

Received: November 19, 2020

Accepted: December 30, 2020

Competing interests

The authors declare no competing interests.

Abbreviations

CT: computed tomography

LV: left ventricle

RV: right ventricle

ABSTRACT

Introduction: Technological advances in computed tomography have made it possible to assess small, mobile structures such as the coronary arteries and the rest of the heart. Cardiac tomography provides anatomical and functional information.

Objectives: To identify the values of the main anatomical sizes of the cardiac chambers and great vessels, and compare them with the reference values.

Methods: An analytical research and development study was conducted with a population of 325 normotensive, non-obese patients without cardiopulmonary or great vessel structural disease, arrhythmia or significant coronary artery disease. One hundred patients were selected by simple random probability sampling, who underwent dual-source cardiac computed tomography at the Cardiocentro Ernesto Che Guevara, Santa Clara, Cuba.

Results: Left and right ventricular measurements showed differences when compared with most reference values. Aortic diameters increased with age. They were higher in men and were different from the reference values except for the short-axis diameter of the aortic root in end-diastole and short-axis diameter of the descending aorta in end-systole. The pulmonary artery showed significant differences in relation to the reference values.

Conclusions: Measurements of cardiac chambers and great vessels by tomographic techniques are necessary in certain population groups to achieve adequate standardization due to their great variability in relation to different variables. The significant difference with the reference values indicates the need for multicenter studies with larger populations to achieve homogeneity.

Keywords: Multidetector computed tomography, Computed tomography angiography, Coronary arteries, Heart chambers, Reference values

Principales medidas anatómicas de las cavidades cardíacas y grandes vasos por tomografía computarizada cardíaca de doble fuente

RESUMEN

Introducción: Los avances tecnológicos en tomografía computarizada han hecho posible la evaluación de estructuras pequeñas y móviles, como las arterias coronarias y el resto del corazón. La tomografía cardíaca aporta información anatómica y funcional.

Objetivo: Identificar los valores de las principales medidas anatómicas de las cavidades cardíacas y los grandes vasos, y compararlos con los valores de refe-

✉ ME Nápoles Lizano
Cardiocentro Ernesto Che Guevara
Calle Cuba N° 610 e/ Barcelona y
Capitán Velasco. Santa Clara, CP
50200. Villa Clara, Cuba.
E-mail address:
marioenapoles@gmail.com

Authors' contribution

MENL and RAIA: Conception and design of the research; collection, analysis and interpretation of data, and drafting of the manuscript. MPD: Conception and design of the research, and assistance in writing the manuscript. All authors critically reviewed the manuscript and approved the final report.

rencia utilizados.

Método: Se realizó un estudio analítico de investigación y desarrollo con un universo de 325 pacientes normotensos, no obesos, sin enfermedad estructural cardiopulmonar o de grandes vasos, arritmia o enfermedad coronaria significativa, de donde se seleccionaron 100 pacientes por muestreo probabilístico aleatorio simple, a quienes se les realizó tomografía computarizada cardíaca de doble fuente en el Cardiocentro Ernesto Che Guevara, Santa Clara, Cuba.

Resultados: Las mediciones ventriculares izquierda y derecha mostraron diferencias con la mayoría de los valores referenciales. Los diámetros de la aorta, aumentaron con la edad, fueron superiores en los hombres y difieren de los valores de referencia con excepción del medido en eje corto de la raíz aórtica en telediástole, y el diámetro en eje corto de la aorta descendente en telesístole. La arteria pulmonar mostró diferencias significativas con relación a los valores de referencia.

Conclusiones: Las mediciones de las cavidades cardíacas y los grandes vasos basados en las técnicas tomográficas constituyen una necesidad en determinados grupos poblacionales para lograr una estandarización adecuada debido a su gran variabilidad en relación a distintas variables. La diferencia significativa con los valores de referencia indica la necesidad de estudios multicéntricos con poblaciones mayores para lograr su homogeneidad.

Palabras clave: Tomografía computarizada multidetector, Angiografía por tomografía computarizada, Arterias coronarias, Cavidades cardíacas, Valores de referencia

INTRODUCTION

On November 8, 1895, Wilhelm Conrad Roentgen discovered X-rays in his laboratory (Wurzburg, Germany). This discovery allowed the internal visualization of the human body and years later the diagnosis of various diseases¹.

The spectacular progression of X-rays led to the emergence of computed tomography (CT). In the second half of the 1980s, sequential CT gave way to helical CT. When this technique was thought to have reached its final stage, as other methods such as magnetic resonance imaging had emerged, Kalender *et al.*² revolutionized CT with the spiral acquisition model, which considerably reduced temporal resolution and gradually improved spatial resolution; all of which was achieved by moving from single-row to two-row detectors. Shortly after that, 4-, 16-, 32-, 40-, 64-, 128-, 256-, and 320-frame-per-rotation models came on the scene^{2,3}. Dual-Source CT is another technological milestone that allows a special acquisition method⁴⁻⁷, similar to the equipment used in this study and described below.

Groundbreaking advances in CT have made it possible to assess small and mobile structures, such as the coronary arteries and the rest of the heart. Coronary CT provides anatomical and functional information, and allows for the diagnosis of congenital and acquired diseases⁸. Currently, CT scanning

does not require high doses of radiation and intravenous contrast, greatly reducing complications and contraindications.

It is possible to evaluate the heart and coronary arteries by synchronizing CT imaging with the patient's electrocardiogram. Here lies the difference between coronary CT and CT of any other part of the body. The heart, as a beating, constantly moving organ with small structures, poses a challenge for imaging assessment⁸⁻¹⁰.

Measurements of cardiac structures based on tomographic techniques vary in certain population groups, depending on some variables, such as age, skin color and sex, among others. Therefore, our research aimed to identify the values of the main anatomical measurements of the cardiac chambers and great vessels, and compare them with the reference values applied to this purpose.

METHOD

A comparative analytical, research and development study was conducted in non-obese, normotensive patients, without structural cardiopulmonary or great vessel structural disease, arrhythmia or significant coronary disease, from the provinces of Cienfuegos, Sancti Spíritus, Villa Clara, Ciego de Ávila and Camagüey, who underwent dual-source cardiac CT at the

Cardiocentro Ernesto Che Guevara, Santa Clara, Cuba, from November 2016 to January 2019.

The study population consisted of 325 patients with the aforementioned characteristics and the sample was made up of 100 patients selected by simple random probability sampling.

Computed Tomography Scanner system

The Cardiac and Vascular CT-Imaging Department of the *Cardiocentro Ernesto Che Guevara*, where our study was conducted features a Somaton Definition system (Siemens, Germany) equipped with two X-ray tubes and two corresponding detectors mounted on a single gantry with an angular offset of 90°. With respect to cardiac imaging capabilities, this scanner system offers a high temporal resolution of 83 ms in a mono-segment reconstruction mode. The temporal resolution is independent of the heart rate, which is a major difference from single-source CT systems reliant on multi-segment reconstruction techniques.

SIEMENS image acquisition protocols use ULTRAVIST 370 low-density iodinated contrast agent by using a state-of-the-art ULRISCH Contrast Injector and ECG-triggered high-pitch protocols, using an automatic tube current modulation, thus achieving minimal radiation doses. The image acquisition is synchronized to the R-R interval, which depends on the patient's heart rate.

Angiographic analysis

Measurements were performed by means of multi-planar reconstructions in the short and long axes and in two-, three- and four-chamber views. Additionally, perpendicular cardiac planes of the main pulmonary artery and aorta in axial views were used. For functional or dynamic evaluation of the ventricle and great vessels, we performed the analysis in the two stages of the cardiac cycle, systole and diastole, using volumetric reconstructions for anatomical localization.

In our study, the analysis of the anatomical features of the heart and great vessels was based on the interpretation of images from standard cardiac planes. We used the same nomenclature as the other noninvasive cardiac imaging modalities and recommendations of the expert consensus on coronary CT¹¹.

Statistical analysis

The SPSS Version 15.0 statistical program was used for data processing and inference tests for quantitative variables were performed using Student's t-tests and ANOVA (Analysis Of Variance). Results were compared with the hypothetical values used as international references by using Student's t-test for one sample.

RESULTS

The **figure** shows the distribution of patients according to age and sex, where the age group between 40 and 60 years and female sex predominated, both with equal frequency (55%).

Both ventricular measurements in the study population differed significantly from the reference values (**Table 1**), except the septal-lateral diameter of the right ventricle

Mean values of the thoracic aorta, measured in short axis, according to sex, showed higher values for men in all measurements (**Table 2**). A significant difference was found in the end-diastolic diameter, aortic root area and end-systolic diameters of the ascending and descending aorta. When these variables were compared between both sexes, all showed significant differences with the reference values, except for the end-diastolic diameters of the aortic root and end-systolic diameters of the descending aorta in female sex (**Table 3**).

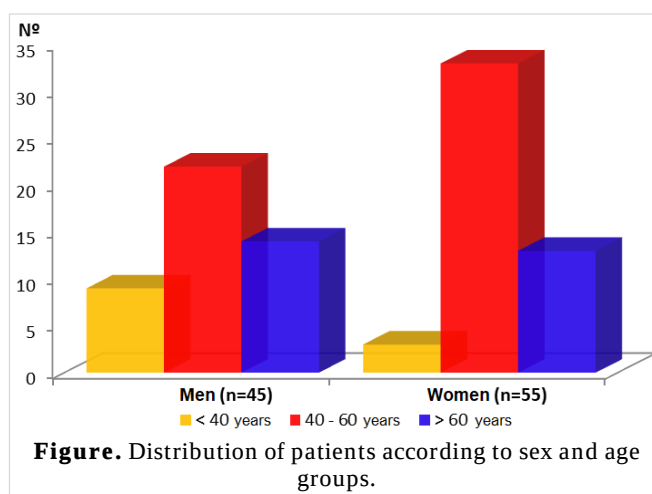


Table 1. Left and right ventricular values compared with reference values.

Short-axis measurements (mm)	Mean	95% confidence interval		Reference value	t	p
LV ejection fraction	60.88	58.89	62.87	63.8	-2.909	0.040
LV end-diastolic volume	122.49	116.62	128.36	143.6	-7.136	<0.0001
LV end-systolic volume	49.19	45.89	52.49	52.6	-2.052	0.043
LV wall thickness	10.17	9.80	10.53	7.3	15.39	<0.0001
RV wall thickness	3.59	3.37	3.81	2.4	10.54	<0.0001
LV septal-lateral diameter	43.77	42.60	44.94	47.4	-1.37	<0.0001
RV septal-lateral diameter	38.05	36.87	39.23	37	1.76	0.081
LV anteroinferior diameter	53.03	51.64	54.42	57.7	-6.65	<0.0001
RV anteroinferior diameter	50.89	48.36	53.42	72.6	-17	<0.0001
LV annular apical diameter	74.65	72.89	76.41	87.6	-14.56	<0.0001
RV annular apical diameter	67.46	65.80	69.12	77.7	-12.25	<0.0001

LV, left ventricle; RV, right ventricle

Table 2. Mean aortic values according to sex.

Short-axis measurements (mm)	Male	Female	Total	t	p
ED diameter of Ao root	32.51	29.62	30.92	3.93	<0.0001
ED area of Ao root (mm ²)	93.27	75.45	83.47	5.06	<0.0001
ED diameter of ascending Ao	30.49	29.22	29.79	1.53	0.13
ES diameter of ascending Ao	31.84	30.24	30.96	2.07	0.04
ED diameter of descending Ao	23.27	22.13	22.64	1.44	0.15
ES diameter of descending Ao	24.04	21.55	22.67	4.86	<0.0001

Ao, aorta; ED, end-diastolic; ES, end-systolic

Table 3. Comparison of aortic values, according to sex, with reference values.

Measurements in short axis (mm)	Mean	95% confidence interval		Reference value	t	p
Female						
ED diameter of Ao root	29.62	28.80	30.44	29	1.51	0.137
ED area of Ao root (mm ²)	75.45	71.89	79.02	69	3.63	0.010
ED diameter of ascending Ao	29.22	28.25	30.18	28	2.53	0.014
ES diameter of ascending Ao	30.24	29.26	31.21	29	2.54	0.014
ED diameter of descending Ao	22.13	20.94	23.31	20	3.59	0.010
ES diameter of descending Ao	21.55	20.86	22.23	22	-1.34	0.187
Male						
ED diameter of Ao root	32.51	31.28	33.74	32	0.87	0.009
ED area of Ao root (mm ²)	93.27	87.15	99.38	85	2.72	<0.0001
ED diameter of ascending Ao	30.49	29.07	31.90	28	3.54	0.001
ES diameter of ascending Ao	31.84	30.59	33.10	30	2.96	0.005
ED diameter of descending Ao	23.27	22.28	24.25	22	2.58	0.013
ES diameter of descending Ao	24.04	23.26	24.83	23	2.69	0.010

Ao, aorta; ED, end-diastolic; ES, end-systolic

Table 4 shows the mean values of the different aortic segments measured, according to the three age groups, where we can appreciate their increase as age advances, with significant differences in the diameters of the ascending ($p=0.009$) and descending aorta ($p<0.0001$), more evident with respect to the group younger than 40 years; however, when comparing these results with the reference values in

this age group, no significant differences were found, while there were significant differences in the 40–60 age group, specifically in the mean values of the ascending ($p=0.01$) and descending ($p<0.0001$) aortic diameters. Similarly, significant differences were found with respect to the reference values in three of the four variables analyzed in patients over 60 years of age: diameter ($p=0.03$) and area ($p=0.01$) of

Table 4. Mean aortic values according to age groups, compared to reference values.

Short-axis end-diastolic measurements (mm)	Mean	95% confidence interval		Reference value	t	p
Under 40 years of age						
Diameter of Ao root	30.06	28.30	31.82	31	-1.13	0.273
Area of Ao root (mm ²)	76.33	68.15	84.52	78	-0.43	0.673
Diameter of ascending Ao*	27.33	25.56	29.11	26	1.58	0.131
Diameter of descending Ao**	19.39	18.23	20.55	20	1.11	0.28
40 - 60 years						
Diameter of Ao root	30.53	29.49	31.57	31	-0.91	0.36
Area of Ao root (mm ²)	83.89	78.97	88.82	80	1.58	0.12
Diameter of ascending Ao*	29.95	28.83	31.06	28	3.48	0.01
Diameter of descending Ao**	23.24	22.09	24.38	20	5.65	<0.0001
Older than 60 years						
Diameter of Ao root	32.30	30.83	33.76	30	3.22	0.03
Area of Ao root (mm ²)	87.37	79.01	95.73	76	2.79	0.01
Diameter of ascending Ao*	31.11	29.55	32.67	31	0.146	0.88
Diameter of descending Ao**	23.59	22.37	24.81	22	2.68	0.01

Ao, aorta

* $p=0.009$ when comparing between age groups

** $p<0.0001$ when comparing between age groups

Table 5. Mean values of pulmonary artery and superior vena cava compared to reference values.

Vessels	Mean	95% confidence interval		Reference value	t	p
Pulmonary artery						
Short-axis diameter	28.09	27.36	28.82	25	8.41	<0.0001
Anteroposterior diameter	27.90	27.23	28.57	26	5.6	<0.0001
Lateral diameter	26.44	25.66	27.22	24	6.1	<0.0001
Aorta-PA ratio in short axis	1.13	1.10	1.15	0.9	17.4	<0.0001
Superior vena cava						
Short-axis	15.2	14.72	15.68	17	-7.43	<0.0001
Long-axis	21.18	20.64	21.72	21	0.6	0.511
Area by planimetry	27.6	26.24	28.96	27	0.87	0.381

PA, pulmonary artery

the aortic root and diameter of the descending aorta ($p=0.01$).

All mean values obtained for the pulmonary artery were significantly different ($p<0.0001$) from the reference values (**Table 5**). A significant difference was found only in the mean value of the minor axis of the vena cava ($p<0.0001$).

DISCUSSION

The first commercially available CT scanner was created by British engineer Godfrey Hounsfield⁴ of EMI Laboratories in 1972 (Nobel Prize in Medicine in 1979); with Allan C. Cormack, a physicist from Cape Town, who developed a mathematical basis, based on Radon's modifications, published in 1917 for reconstruction of cross-sectional images of transmission measurements¹². The first CT scanners, now known as computed axial tomography scanners, were limited to cranial imaging until they were produced for whole-body scanning in 1975. Mechanical CT was insufficient for imaging-moving organs; therefore, in the late 1970s, a quick CT system without rotating gantry, devoted to imaging the heart, was developed; followed by multi-slice technology of rotating sources simultaneously with beam source^{13,14}. The early 1990s saw the introduction of the first helical CT scanner into clinical practice, allowing for rapid coverage of large sections of the body, which was particularly useful for angiographic and cardiac CT applications, thanks to its temporal and spatial resolution, facilitating high-quality imaging of moving and beating organs, such as the heart and great vessels^{13,14}.

The advances in image acquisition were followed by the development of software for reconstructions in the post-processing department, where they are analyzed to reach diagnostic conclusions. In addition to all this, injection and acquisition protocols with the use of low radiation doses, synchronized to the patient's electrocardiogram with submillimeter reconstructions, facilitate the visualization of anatomical details with greater consistency, especially in the heart and vessels of the thorax and mediastinum. This is achieved by the improved spatial and temporal resolution and volumetric acquisition of the dual-source CT, offering a high temporal resolution of 83 ms, using detectors with 64 rows collimated 0.625-mm thickness, with a total z-coverage of 40 mm volume/longitudinal axis of the body at each 360-degree rotation^{8-10,15-17}.

Lin *et al.*¹⁸ conducted an investigation quite similar to ours with a similar number and characteristics in terms of the patients studied. Generally, measurements and volumes of both ventricles slightly differ from our results and some of them present significant statistical differences.

These authors established specific values, according to age and sex, for the size, function and mass of all cardiac chambers in adults without cardiovascular disease, hypertension or obesity; and propose these data to be used as reference for future multidetector CT studies. For their part, Stojanovska *et al.*¹⁹ normalized the reference range for volume, function and mass of both ventricles, according to age, sex and body surface area, and observed statistically significant differences between men and women in both left ventricular mass and right ventricular volume ($p < 0.0001$). Additionally, age and sex were associated with significant differences in right ventricular end-diastolic volume ($p=0.027$) and left ventricular ejection fraction ($p=0.03$). Similar results have been found by other authors²⁰⁻²².

Thoracic aorta values were significantly higher in male patients, which is justified by the difference in body surface area. However, these parameters had a less significant difference from the reference pattern, probably related to the lower variability of the aortic diameters of these segments with respect to body surface area. When we analyzed these same variables according to the three age groups we could observe that the variation in the aortic diameters of any segment studied increases proportionally with age, and a significant difference were found for the diameters of the ascending and descending aorta. These results also coincide with another study by Lin *et al.*²³.

Values for each parameter of the pulmonary artery and superior vena cava showed significant differences compared with the reference standards, but are similar to those found by Edwards *et al.*²⁴ and to those described by Sonavane *et al.*²⁵, respectively.

CONCLUSIONS

Measurements of cardiac chambers and great vessels based on dual-source multi-slice CT are required in certain population groups to achieve adequate standardization due to their great variability in relation to different variables, such as skin color (or race), age and sex, among other variables. Its significant differences with the reference values and with-

in the same population group indicate that multicenter studies should be conducted with larger populations to achieve adequate homogeneity of these measurements.

REFERENCES

1. Röntgen WC. Über Eine Neue Art Von Strahlen. Sitzungsberichte der physikalisch-medizinischen gesellschaft zu Würzburg. Berlin: Springer-Verlag. 1895.
2. Kalender WA, Seissler W, Klotz E, Vock P. Spiral volumetric CT with single-breath-hold technique, continuous transport, and continuous scanner rotation. *Radiology*. 1990;176(1):181-3. [DOI]
3. Flohr TG, Schaller S, Stierstorfer K, Bruder H, Ohnesorge BM, Schoepf UJ. Multi-detector row CT systems and image-reconstruction techniques. *Radiology*. 2005;235(3):756-73. [DOI]
4. Brooks RA. A quantitative theory of the Hounsfield unit and its application to dual energy scanning. *J Comput Assist Tomogr*. 1977;1(4):487-93. [DOI]
5. McCollough CH, Primak AN, Saba O, Bruder H, Stierstorfer K, Raupach R, et al. Dose performance of a 64-channel dual-source CT scanner. *Radiology*. 2007;243(3):775-84. [DOI]
6. Kalender WA, Perman WH, Vetter JR, Klotz E. Evaluation of a prototype dual-energy computed tomographic apparatus. I. Phantom studies. *Med Phys*. 1986;13(3):334-9. [DOI]
7. Johnson TR, Krauss B, Sedlmair M, Grasruck M, Bruder H, Morhard D, et al. Material differentiation by dual energy CT: initial experience. *Eur Radiol*. 2007;17(6):1510-7. [DOI]
8. Gerber TC, Carr JJ, Arai AE, Dixon RL, Ferrari VA, Gomes AS, et al. Ionizing radiation in cardiac imaging: a science advisory from the American Heart Association Committee on Cardiac Imaging of the Council on Clinical Cardiology and Committee on Cardiovascular Imaging and Intervention of the Council on Cardiovascular Radiology and Intervention. *Circulation*. 2009;119(7):1056-65. [DOI]
9. Choi TY, Malpeso J, Li D, Sourayanezhad S, Budoff MJ. Radiation dose reduction with increasing utilization of prospective gating in 64-multidetector cardiac computed tomography angiography. *J Cardiovasc Comput Tomogr*. 2011; 5(4):264-70. [DOI]
10. Jakobs TF, Becker CR, Ohnesorge B, Flohr T, Suess C, Schoepf UJ, et al. Multislice helical CT of the heart with retrospective ECG gating: reduction of radiation exposure by ECG-controlled tube current modulation. *Eur Radiol*. 2002;12(5):1081-6. [DOI]
11. Mark DB, Berman DS, Budoff MJ, Carr JJ, Gerber TC, Hecht HS, et al. ACCF/ACR/AHA/NASCI/SAIP/SCAI/SCCT 2010 expert consensus document on coronary computed tomographic angiography: A report of the American College of Cardiology Foundation Task Force on Expert Consensus Documents. *Circulation*. 2010;121(22):2509-43. [DOI]
12. Radon J. Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten (On the determination of functions from their integral values along certain manifolds). *Berichte über die Verhandlungen der Königlich-Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig. Mathematisch-Physische Klasse*. 1917;69:262-7.
13. Wicky S, Rosol M, Hoffmann U, Graziano M, Yucel KE, Brady TJ. Comparative study with a moving heart phantom of the impact of temporal resolution on image quality with two multidetector electrocardiography-gated computed tomography units. *J Comput Assist Tomogr*. 2003;27(3):392-8. [DOI]
14. Nieman K, Rensing BJ, van Geuns RJ, Vos J, Pattynama PM, Krestin GP, et al. Non-invasive coronary angiography with multislice spiral computed tomography: impact of heart rate. *Heart*. 2002; 88(5):470-4. [DOI]
15. Bastarrika G, Arraiza M, Arias J, Broncano J, Zudaire B, Pueyo JC, et al. Coronariografía mediante tomografía computarizada de doble fuente: calidad de imagen e intervalo de reconstrucción óptimo. *Radiología*. 2009;51(4):376-84. [DOI]
16. Ropers D, Baum U, Pohle K, Anders K, Ulzheimer S, Ohnesorge B, et al. Detection of coronary artery stenoses with thin-slice multi-detector row spiral computed tomography and multiplanar reconstruction. *Circulation*. 2003;107(5):664-6. [DOI]
17. Nieman K, Cademartiri F, Lemos PA, Raaijmakers R, Pattynama PM, de Feyter PJ. Reliable noninvasive coronary angiography with fast submillimeter multislice spiral computed tomography. *Circulation*. 2002;106(16):2051-4. [DOI]
18. Lin FY, Devereux RB, Roman MJ, Meng J, Jow VM, Jacobs A, et al. Cardiac chamber volumes, function, and mass as determined by 64-multidetector row computed tomography: mean values among healthy adults free of hypertension

- and obesity. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2008;1(6):782-6. [DOI]
19. Stojanovska J, Prasitdumrong H, Patel S, Sundaram B, Gross BH, Yilmaz ZN, *et al*. Reference absolute and indexed values for left and right ventricular volume, function and mass from cardiac computed tomography. *J Med Imaging Radiat Oncol*. 2014;58(5):547-58. [DOI]
20. Nuffer Z, Baran TM, Krishnamoorthy V, Kaproth-Joslin K, Chaturvedi A. Accuracy of Non-Electrocardiographically Gated Thoracic CT Angiography for Right Atrial and Right Ventricular Enlargement. *Radiol Cardiothorac Imaging* [Internet]. 2019 [cited Nov 17, 2020];1(4):e190008. Available at: <https://doi.org/10.1148/ryct.2019190008>
21. Koo HJ, Lee JG, Ko JY, Lee G, Kang JW, Kim YH, *et al*. Automated Segmentation of Left Ventricular Myocardium on Cardiac Computed Tomography Using Deep Learning. *Korean J Radiol*. 2020; 21(6):660-9. [DOI]
22. Abdelrahman KM, Chen MY, Dey AK, Virmani R, Finn AV, Khamis RY, *et al*. Coronary Computed Tomography Angiography From Clinical Uses to Emerging Technologies: JACC State-of-the-Art Review. *J Am Coll Cardiol*. 2020;76(10):1226-43. [DOI]
23. Lin FY, Devereux RB, Roman MJ, Meng J, Jow VM, Jacobs A, *et al*. Assessment of the thoracic aorta by multidetector computed tomography: age- and sex-specific reference values in adults without evident cardiovascular disease. *J Cardiovasc Comput Tomogr*. 2008;2(5):298-308. [DOI]
24. Edwards PD, Bull RK, Coulden R. CT measurement of main pulmonary artery diameter. *Br J Radiol*. 1998;71(850):1018-20. [DOI]
25. Sonavane SK, Milner DM, Singh SP, Abdel Aal AK, Shahir KS, Chaturvedi A. Comprehensive Imaging Review of the Superior Vena Cava. *Radiographics*. 2015;35(7):1873-92. [DOI]